



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

“Estudio sobre la eficiencia energética de una motocicleta eléctrica”

Autor: Beatriz Mayo Mendoza

Tutor: Mauricio Alba Lucero

Director: Juan Carlos García

Leganés, Mayo de 2011



Universidad Carlos III de Madrid
Estudio sobre la eficiencia energética de una motocicleta eléctrica

Título: “Estudio sobre la eficiencia energética de una motocicleta eléctrica”.

Autora: Beatriz Mayo Mendoza.

Director: Juan Carlos García.

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



PROYECTO FIN DE CARRERA:

“Estudio sobre la eficiencia energética de una motocicleta eléctrica”

Resumen

El presente proyecto fin de carrera trata de realizar un estudio de eficiencia de los elementos que forman la cadena energética de un vehículo, ya sea motocicleta, automóvil, etc. Estos elementos son la batería eléctrica, el controlador, el motor eléctrico, el sistema de transmisión y la rueda.

Se analizará el concepto de eficiencia por medio de otro concepto ligado a éste, las pérdidas energéticas. Por esto, en cada uno de los elementos mencionados, se evaluarán las pérdidas que sufre tanto de forma teórica como de forma práctica (aunque habrá elementos de los que no se dispondrá de datos prácticos de donde obtener información sobre pérdidas) para definir la eficiencia como la diferencia entre la energía de salida respecto de la de entrada. Esta diferencia de valores vendrá determinada por las pérdidas.

Además de evaluar las pérdidas de cada parte del sistema, se determinarán los parámetros que afectan a esa eficiencia y se tratará de obtener un valor o ecuación de eficiencia del conjunto.

De este modo, se determinará, en algunos casos de forma teórica, en otros, de forma práctica y en otros, de ambas, los parámetros que afectan a la eficiencia en cada uno de estos elementos así como una ecuación que defina el concepto de eficiencia en cada uno de ellos.

Palabras clave: Eficiencia, batería, motor, controlador, sistema de transmisión y rueda.



Agradecimientos

A mi tutor, Mauricio Alba Lucero, por la ayuda y la orientación que he recibido por su parte durante toda la redacción de mi proyecto.

A mi compañero Adrián, por la resolución de todas mis dudas, y a José Pérez, por su interés.

Por último, darle las gracias a Juan Carlos García por abrirme las puertas de su grupo de investigación.



Dedicatoria

A mis padres, por la educación y el cariño que me han dado a lo largo de toda mi vida.

A mi hermana Rocío, por ser un ejemplo a seguir en muchas facetas de la vida.

A Javier, por haber estado ahí siempre que le he necesitado.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	19
1.1. INTRODUCCIÓN	19
1.2. OBJETIVOS	22
1.3. FASES DEL DESARROLLO	24
1.4. MEDIOS EMPLEADOS	24
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	24
2. PARTE I: BATERÍAS	26
2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BATERÍAS	26
2.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA BATERÍA	27
2.2.1. Voltaje nominal	27
2.2.2. Capacidad de carga/descarga.....	29
2.2.3. Potencia.....	31
2.2.4. Energía almacenada.....	31
2.2.5. Energía específica.....	32
2.2.6. Tasa de auto-descarga.....	33
2.2.7. Ciclo de vida	33
2.2.8. Temperatura.....	35
2.2.9. Eficiencia	36



2.2.10.	Vida útil	37
2.3.	TIPOS DE BATERIAS.....	39
2.3.1.	Baterías de iones de litio (Li-ión)	39
2.3.2.	Baterías de polímero de litio (Li-Po)	42
2.4.	COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS BASADAS EN LITIO	45
2.5.	EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS BATERÍAS	46
2.5.1.	Factores que afectan a la eficiencia de las baterías	47
2.5.2.	Estudio sobre la eficiencia de la batería.....	54
2.5.3.	Resultados y conclusiones sobre la eficiencia	59
3.	PARTE II: CONTROLADOR.....	64
3.1.	FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES.....	64
3.2.	CONTROL PARA MOTORES DE CONTINUA	65
3.2.1.	Motor de excitación independiente.....	66
3.2.2.	Motor de excitación serie.....	69
3.2.3.	Método de control. Modulación PWM.....	71
3.2.4.	Circuito de conmutación. Chopper	73
3.2.5.	Sistemas de regulación de los motores de continua.....	85
3.3.	CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.....	88
3.3.1.	Motores de jaula de ardilla.....	89
3.3.2.	Método de control de los motores de corriente alterna.....	93
3.3.3.	Circuito de conmutación. Inversor	97
3.3.4.	Sistemas de regulación de la máquina de alterna	103



3.4.	SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONMUTACIÓN	107
3.5.	EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL CONTROLADOR.....	109
3.5.1.	Factores que afectan a la eficiencia del controlador	109
3.5.2.	Estudio sobre la eficiencia de los controladores	110
3.5.3.	Resultados y conclusiones.	114
4.	PARTE III: MOTOR ELÉCTRICO	119
4.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	119
4.1.1.	Motores eléctricos de corriente alterna	119
4.1.2.	Motores eléctricos de corriente continua	120
4.2.	TEORÍA SOBRE MOTORES.....	124
4.2.1.	Motores de corriente directa o continua	124
4.2.2.	Funcionamiento de los motores de inducción	130
4.2.3.	Motores trifásicos	133
4.3.	EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	134
4.3.1.	Métodos de determinación de la eficiencia	135
4.3.2.	Normativa sobre eficiencia	136
4.3.3.	Eficiencia de los motores de continua	140
4.3.4.	Eficiencia de los motores de alterna	142
4.3.5.	Factores que afectan a la eficiencia del motor.....	144
4.3.6.	Resultados y conclusiones	150
5.	PARTE IV: SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	152



5.1.	TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.....	153
5.1.1.	Transmisión mediante ruedas de fricción.....	153
5.1.2.	Transmisión por correa.....	154
5.1.3.	Transmisión por cadena.....	155
5.1.4.	Transmisión por junta universal	156
5.2.	JUNTA UNIVERSAL	156
5.2.1.	Elementos del sistema de transmisión	156
5.2.2.	Modos de realizar la transmisión.....	162
5.3.	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN	164
5.3.1.	Cálculo teórico de eficiencias	165
5.3.2.	Eficiencia de cada transmisión. Factores que influyen.	173
5.3.3.	Resultados y conclusiones	181
6.	PARTE V: RUEDA	183
6.1.	CONCEPTO DE RUEDA Y PARTES	183
6.2.	TEORÍA SOBRE LA RODADURA.....	185
6.3.	EFICIENCIA DE LA RUEDA.....	189
6.3.1.	Eficiencia de la rueda metálica. Parámetros que le afectan.	190
6.3.2.	Eficiencia del neumático. Parámetros que le afectan.	190
6.3.3.	Resumen y conclusiones sobre la eficiencia.....	196
7.	CONCLUSIONES.....	198
8.	TRABAJOS FUTUROS	207



RECOMENDACIONES	208
BIBLIOGRAFÍA	210
ANEXO I.....	214
ANEXO II	215
ANEXO III.....	232
ANEXO IV	233
ANEXO V	236



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Emisiones permitidas en vehículo de motor de gasolina según normativa.	21
Tabla 2. Emisiones permitidas en vehículo de motor diesel según normativa.	22
Tabla 3. Comparativa de las diferentes baterías basadas en litio. [17] [18]	46
Tabla 4. Densidad de carga de una batería para distintas temperaturas.	49
Tabla 5. Valores teóricos de eficiencia de una batería Lipo según Ley de Ohm.	57
Tabla 6. Comparativa entre normativas IEC sobre métodos de medida de eficiencias.	138
Tabla 7. Niveles de eficiencia de los motores según norma IEC 60034-30.	139
Tabla 8. Cuadro resumen de datos sobre las pérdidas en un motor de inducción. [29]	145
Tabla 9. Eficiencias para distintas combinaciones de diámetros piñón-plato de la bicicleta.	175
Tabla 10. Cuadro de coeficientes de rodadura de varios tipos de ruedas. [38]	189
Tabla 11. Valores de C_{rr} para distintos neumáticos tipo tubular y clincher. [39]	194
Tabla 12. Rendimiento y potencias medias suministradas por la celda PQ5000-XP ensayada.	203
Tabla 13. Variación de la eficiencia con la carga de un motor de 10 kW (IE1).	203
Tabla 14. Rendimientos parciales y totales de la cadena energética para distintos puntos de funcionamiento.	205



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de transmisión de la energía de la que se estudia la eficiencia.....	23
Figura 2. Curvas de una batería de voltaje vs tiempo. [9]	29
Figura 3. Curvas de una batería de Li-ion a diversas intensidades de descarga a temperatura constante. [10]	29
Figura 4. Cambios en la capacidad de la batería frente al tiempo de descarga. [8].....	31
Figura 5. Densidad de energía por masa y volumen. [11]	32
Figura 6. Características del ciclo de vida de una batería con un 100% de profundidad de descarga (DOD). [12]	34
Figura 7. Características del ciclo de vida de una batería con un 80% de profundidad de descarga (DOD). [12]	34
Figura 8. Características del ciclo de vida de una batería con un 20% de profundidad de descarga (DOD). [12]	35
Figura 9. Influencia de la temperatura en las curvas de descarga de la batería Li-ion. [10]	36
Figura 10. Influencia de la temperatura en la vida útil de una batería de ion litio. [10]	37
Figura 11. Mecanismo de carga/descarga de una batería de ión litio. [15]	40
Figura 12. Carga específica para distintos ánodos. [15]	41
Figura 13. Masa necesaria para producir 1 A durante 1 hora. [15]	41
Figura 14. Curvas de aprovechamiento de las baterías. [16]	43
Figura 15. Comparación entre descargas de baterías. [16]	44
Figura 16. Modelo Randles de una batería.	51



Figura 17. Método de carga DC.	52
Figura 18. Método de conductancia AC.....	53
Figura 19. Método de Espectroscopia.	53
Figura 20. Potencia teórica disipada en la batería según la Ley de Ohm.	55
Figura 21. Valores de la resistencia interna de la batería ensayada.	60
Figura 22. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 1.	61
Figura 23. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 2.	61
Figura 24. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 3.	61
Figura 25. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 1.	62
Figura 26. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 2.	62
Figura 27. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 3.	63
Figura 28. Esquema del sistema de regulación de la máquina de continua.	65
Figura 29. Esquema de un motor de excitación independiente.	66
Figura 30. Curva par-velocidad de un motor de continua de excitación independiente. [21].....	68
Figura 31. Regiones de control de un motor de continua con excitación independiente. [21].....	69
Figura 32. Esquema eléctrico de un motor de continua con excitación serie.....	70
Figura 33. Curva par-velocidad de un motor de corriente continua con excitación serie. [21].....	71
Figura 34. Velocidad-tensión suministrada de un motor de continua con control PWM. [22].....	72
Figura 35. Variación en los anchos de pulso del control PWM para obtener mayor o menor velocidad. [22].....	72
Figura 36. Cuadrantes de funcionamiento de los choppers. [23]	73
Figura 37. Esquema eléctrico de un chopper directo [23]	74



Figura 38. Curvas de tensión y corriente en la carga (chopper directo). [23]	75
Figura 39. Esquema eléctrico de un chopper inverso. [23]	76
Figura 40. Curvas de tensión y corriente en la carga (chopper inverso). [23].....	77
Figura 41. Esquema eléctrico de un chopper de dos cuadrantes. [23].....	78
Figura 42. Esquema eléctrico de un chopper de dos cuadrantes. [23].....	78
Figura 43. Símbolo del tiristor y tres uniones pn. [23].....	80
Figura 44. Símbolo del GTO. [23]	81
Figura 45. MOSFET's tipo N y tipo P. [23].....	82
Figura 46. Esquema eléctrico de un MOSFET. [23].....	83
Figura 47. Símbolo del IGBT. [23]	84
Figura 48. Estructura básica del transistor IGBT. [23].....	84
Figura 49. Esquema de un sistema de regulación en lazo abierto. [22]	86
Figura 50. Esquema sistema de regulación lazo cerrado con único bucle de control. [22].....	87
Figura 51. Esquema de un sistema de regulación en lazo cerrado con dos bucles de control anidados. [22]	88
Figura 52. Esquema del circuito de control de la máquina de alterna.	89
Figura 53. Circuito equivalente de la máquina de inducción.	90
Figura 54. Circuito equivalente aproximado de la máquina de inducción [24].	92
Figura 55. Curva característica típica par-velocidad de un motor de inducción. [24].....	94
Figura 56. Curva característica par-velocidad de un motor de inducción que muestra los rangos extendidos de operación. (Región de frenado y región de generación.) [24]	94
Figura 57. Circuito representativo de un inversor trifásico. [23]	97



Figura 58. Formas de onda de las tensiones fase-neutro del circuito inversor en función del ángulo de conmutación (wt). [22]	98
Figura 59. Formas de onda de tensión entre fases R, S y T del sistema resultante. [22].....	98
Figura 60. Gráficos obtenidos tras la conmutación en el inversor trifásico. [22]	99
Figura 61. Circuito inversor monofásico de media onda. [23]	100
Figura 62. Circuito inversor monofásico de onda completa. [23]	101
Figura 63. Esquema eléctrico de un tiristor. [23]	102
Figura 64. Esquema eléctrico de un TRIAC. [23].....	102
Figura 65. Circuito equivalente de un TRIAC. [23].....	103
Figura 66. Sistema trifásico (a, b, c.).....	103
Figura 67. Sistema de coordenadas (α , β).	104
Figura 68. Sistema de coordenadas (d, q) superpuesto en el modelo de máquina.	104
Figura 69. Diagrama de bloques del control vectorial de tipo directo. [22].....	106
Figura 70. Diagrama de bloques del control vectorial de tipo indirecto. [22].....	107
Figura 71. Máximas corrientes, tensiones y frecuencias alcanzadas por varios dispositivos de conmutación. [25].....	109
Figura 72. Formas de onda del interruptor, en conmutación. [25]	111
Figura 73. Modelo del tiristor.....	112
Figura 74. Modelo del MOSFET.	113
Figura 75. Modelo del IGBT.	114
Figura 76. Esquema de un MOSFET con las tensiones y corrientes existentes.....	115
Figura 77. Curvas características del MOSFET.	115



Figura 78. Curvas tensión-corriente del MOSFET.	116
Figura 79. Tensión y corriente en el MOSFET durante la conmutación.	117
Figura 80. Clasificación de los motores de corriente continua.....	121
Figura 81. Esquema eléctrico de un motor en derivación.	122
Figura 82. Esquemas eléctricos de los dos tipos de motores de excitación compuesta.	123
Figura 83. Partes de un motor de corriente directa o continua.	124
Figura 84. Rotor de una máquina de corriente continua	125
Figura 85. Esquema de un colector de delgas de una máquina de corriente continua.	125
Figura 86. Esquema simplificado de funcionamiento de una máquina de continua.	126
Figura 87. Esquema de un motor cc con escobillas.....	128
Figura 88. Esquema constructivo de un motor brushless.	130
Figura 89. Esquema constructivo de un motor de inducción.	131
Figura 90. Máquina asíncrona de jaula de ardilla.....	132
Figura 91. Máquina asíncrona de rotor bobinado.....	133
Figura 92. Formas de onda de tensión de alimentación de un motor trifásico.	134
Figura 93. Visión general de las normas alrededor del mundo.	137
Figura 94. Esquema de pérdidas en un motor de continua.	140
Figura 95. Diagrama de flujo de potencia activa de un motor de alterna.....	143
Figura 96. Flujo de potencia activa en un motor de inducción trifásico.....	144
Figura 97. Eficiencia energética del motor en función de la carga. [24].....	145
Figura 98. Pérdidas en el motor en función de la carga. [24].....	147
Figura 99. Resultado de la distribución de pérdidas en un motor de inducción. [30]	148



Figura 100. Diagrama de potencias de un motor asíncrono trifásico.	149
Figura 101. Esquema del sistema de transmisión de un vehículo. [32]	152
Figura 102. Sentido de giro de las ruedas de fricción.....	153
Figura 103. Diferentes tipos de ruedas de fricción.	153
Figura 104. Sistema de transmisión de una motocicleta.	156
Figura 105. Sistema de transmisión de un vehículo. [32]	157
Figura 106. Esquema de la actuación de un embrague.	157
Figura 107. Disposición de las marchas en la caja de cambios.	159
Figura 108. Cálculo de velocidades en la caja de cambios.	161
Figura 109. Ejemplos de transmisión de par y velocidad en una caja de cambios.....	161
Figura 110. Esquema de un sistema de transmisión simple.	163
Figura 111. Esquema de un sistema de transmisión compuesta.....	164
Figura 112. Conjuntos de fuerzas en el rozamiento estático.	167
Figura 113. Conjuntos de fuerzas en el rozamiento dinámico.	168
Figura 114. Fuerzas de contacto para calcular el rendimiento.	170
Figura 115. Relación entre la eficiencia y la tensión en la cadena.	175
Figura 116. Fuerzas actuantes en la correa cuando está parado o no cargada.....	177
Figura 117. Fuerzas actuantes en la correa cuando está cargada.....	177
Figura 118. Sistema de fuerzas de una polea en movimiento.	178
Figura 119. Detalle de junta cardan.....	180
Figura 120. Partes de una rueda metálica.	184
Figura 121. Partes del neumático.	184



Figura 122. Condiciones de rodadura.....	186
Figura 123. Fuerzas sobre una rueda.	187
Figura 124. Influencia del ancho del neumático.	192
Figura 125. Diferentes áreas de contacto de neumáticos de distinto ancho.	192
Figura 126. Potencia necesaria para rodar con distintos neumáticos tipo clincher. [39].....	193
Figura 127. Medidas de los valores de C_{rr} a distintas presiones de inflado de las ruedas. [39] ...	195
Figura 128. Cadena energética estudiada.	200
Figura 129. Rendimiento Vs Potencia de la cadena.	205



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por los altos niveles de contaminación atmosférica, los efectos nocivos del cambio climático y la crisis energética mundial son tres problemas importantes derivados del uso abusivo de combustibles fósiles.

El desarrollo económico y social depende fuertemente de este tipo de combustible el cual provoca la emisión de gases contaminantes.

Todos estos problemas están propiciando el desarrollo de los vehículos eléctricos como forma alternativa de desplazamiento ya que la electricidad es una fuente de energía más respetuosa con el medio ambiente.

Alguna de las ventajas que ofrecen estos vehículos eléctricos son [1]:

- **Bajo coste de movilidad**

El vehículo eléctrico posee altos costes de adquisición, por ello, no es hasta el sexto año cuando la ventaja de los vehículos eléctricos frente a los de gasolina se hace más evidente. [2]

A partir de este sexto año, el vehículo eléctrico es notablemente más rentable que el resto de las tecnologías y presenta un ahorro del 21%.

Por todo ello, son alrededor de 15 veces más rentables que los modelos de gasolina. Basta hacer una sencilla cuenta para obtener esta proporción. El coste del vehículo eléctrico es de 0,37€/100 Km mientras que el precio medio de la gasolina 95 en Madrid es de 1,28 € [3]. El consumo medio de un automóvil de gama baja y tamaño pequeño es de 5,1 l/100 Km por lo que el consumo de este tipo de vehículos es de 6,4€/100 km. [4]

Con esta sencilla operación vemos que el coste de movilidad de un vehículo de gasolina frente a uno eléctrico es de alrededor de 17 veces.

Además, las nuevas baterías permiten una autonomía de hasta 130 kilómetros, una cantidad nada despreciable para el consumo diario. Cabe destacar que los precios de las baterías encarecen mucho los costes de estos vehículos pero ya se están firmando acuerdos entre fabricantes de vehículos y de baterías para desarrollar estos productos. [5]

De lo que no cabe duda es que los vehículos eléctricos permiten una forma ágil, rápida y ecológica de desplazamiento.

- **Emisiones nulas**

Los vehículos eléctricos no contaminan, principalmente porque no emiten monóxido de carbono, ni óxido nítrico, etc. Al no necesitar gasolina no se genera la contaminación que produce su extracción y todos los accidentes y vertidos que suceden durante su transporte hasta los consumidores.

Y aunque la electricidad también haya que generarla, lo ideal sería que fuera generada a partir de energías renovables como la energía eólica, solar, etc.

Para conocer el nivel de emisiones que genera un automóvil es interesante fijarse en la normativa europea sobre emisiones [6]. Las normas de emisión Euro determinan los límites máximos autorizados de emisión de contaminantes para los vehículos turismos y vehículos comerciales ligeros tanto de motor de gasolina como diesel (en masa límite de las emisiones de Óxidos nitrosos NOx, de Monóxido de Carbono CO, de Hidrocarburos HC y NOx, de Partículas PM en mg/km).

Se aplican según la fecha de puesta en servicio del vehículo, como se precisa a continuación:

- Euro 0: puesta en servicio después de 1988.
- Euro 1: puesta en servicio después de 1993.
- Euro 2: puestos en servicio después de 1996.
- Euro 3: puestos en servicio después de 2000.
- Euro 4: puestos en servicio después de 2005.
- Euro 5: después de septiembre de 2009 para la recepción y enero de 2011 para la matriculación de nuevos vehículos.



- Euro 6: después de septiembre de 2014 para la recepción y septiembre de 2015 para la matriculación de nuevos vehículos.

Estos valores son los reflejados en las tablas 1 y 2 siguientes:

Motor gasolina	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Año aplicación	Junio 1992	Enero 1996	Enero 2000	Enero 2005	Sept. 2009	Sept. 2010
CO (mg/km)	3160	2200	2300	1000	1000	1000
HC (mg/km)	X	X	200	100	100	100
HC + NOx (mg/km)	1130	500	X	X	X	X
NOx (mg/km)	X	X	150	80	60	60
NMHC (mg/km)	X	X	X	X	68	68

X: valor no crítico; NMHC: n° Metano Hidrocarburos

Tabla 1. Emisiones permitidas en vehículo de motor de gasolina según normativa.

Motor diesel	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
Año aplicación	Junio 1992	Enero 1996	Enero 2000	Enero 2005	Sept. 2009	Sept. 2010
CO (mg/km)	2720	100	640	500	500	500
HC + NOx(mg/km)	X	700/900*	300	300	230	170
NOx (mg/km)	X	X	500	250	180	80

Motor diesel	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6
PM (mg/km)	140	80/100*	50	25	5	5

X: valor no crítico; * Valores más altos para la introducción en el mercado de motores de encendido directo

Tabla 2. Emisiones permitidas en vehículo de motor diesel según normativa.

- **Ruido**

Otra de las principales ventajas de los vehículos eléctricos es que no generan contaminación acústica lo que permite crear una ciudad más humana y limpia.

- **Impuestos**

Para fomentar el uso de estos vehículos eléctricos no contaminantes, los ayuntamientos favorecen su uso mediante la eliminación o rebaja de impuestos.

- **Mantenimiento**

Al ser mucho más simples y sencillos que los motores normales, con menos partes móviles, presentan menos riesgo de avería, reduciéndose el coste de mantenimiento.

Por otro lado tampoco son necesarios los cambios regulares de filtros y aceites de los motores de gasolina convencionales.

Por todas estas razones son muchos los esfuerzos que se están dedicando al desarrollo, producción y comercialización de estos tipos de vehículos.

1.2. OBJETIVOS

Para poder desarrollar un sistema eficiente de alimentación eléctrica a los vehículos, se han de estudiar las eficiencias de los bloques que forman la alimentación desde su inicio en la batería hasta la llegada al elemento final de la cadena, que será la rueda.

En este proyecto se medirá por separado la eficiencia de la batería, controlador, motor, sistema de transmisión y rueda, así como los parámetros que le afectan, para, por último, estudiarlo en bloque y poder obtener la eficiencia combinada del sistema.

Este estudio se aplicará, finalmente, a un caso real. Dicho caso real es la motocicleta eléctrica construida en el laboratorio de mecánica de la universidad.

Un esquema de la cadena estudiada puede ser el ilustrado en la figura 1.



Figura 1. Cadena de transmisión de la energía de la que se estudia la eficiencia.

En ella se puede ver como la energía se suministra desde una batería eléctrica. Pasa por un controlador utilizado para gobernar la siguiente etapa de la cadena que es el motor eléctrico. A continuación, y debido a la potencia que se genera en el eje del motor, se transmite el par a la rueda por medio del sistema de transmisión.

Por lo tanto, podemos concluir que el objetivo principal de este proyecto fin de carrera es obtener el valor de la eficiencia de la cadena energética anteriormente mencionada. No se va a considerar la influencia de parámetros que afecten a la pérdida aerodinámica del vehículo por dos razones, para hacer este estudio de eficiencia más general y válido para cualquier vehículo eléctrico (automóvil, motocicleta, autobús,...) que utilice esta cadena energética y para poder concluir el estudio de la cadena en la rueda y no más allá de ella.

A partir de este estudio podemos deducir cuáles son los valores de las eficiencias de los elementos que forman dicha alimentación eléctrica y que factor o factores les afectan.



1.3. FASES DEL DESARROLLO

Para llevar a cabo el estudio de las eficiencias, la cadena energética se ha desglosado en los elementos que intervienen en la misma y que comprende desde la alimentación inicial al movimiento mecánico final. Para cada uno de estos elementos se ha considerado todas las posibilidades existentes en el mercado y que puedan realizar la labor precisa para, al final, elegir una de ellas.

Una vez tenemos elegido que elementos se van a utilizar y cuáles son sus requerimientos se puede estudiar el bloque en su conjunto y definir el objetivo principal que es la eficiencia global del sistema.

Para poder redactar este proyecto fin de carrera se han tenido que consultar numerosas fuentes de información tales como normativas, libros, apuntes de distintas asignaturas de la carrera, páginas webs, publicaciones en revistas tecnológicas, proyectos fin de carrera de compañeros de la universidad, hojas de características de distintos componentes, catálogos de fabricantes de distinto material, etc.

Con todo ello se ha podido conseguir una idea de los factores que afectan a la eficiencia de motores, baterías, etc. a nivel teórico así como un valor de dicha eficiencia.

1.4. MEDIOS EMPLEADOS

Como se señalaba en puntos anteriores, se han tenido que consultar diversas fuentes de información para obtener los datos de interés de este proyecto. Por ello, la utilización de libros, manuales, catálogos, etc. a lo largo de todo el proceso de redacción de esta memoria ha sido importante.

No se han obtenido datos a nivel práctico en laboratorio ni se han utilizado ordenadores ni simuladores ya que el análisis es meramente teórico.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada parte.

En la primera parte, se hablará sobre las baterías. Se detallará su funcionamiento así como los parámetros característicos. Se analizarán más en detalle las baterías basadas en litio tales como las



baterías de ion litio y las baterías de polímero de litio y se efectuará una breve comparación entre ellas en función de ciertas características. Por último, se estudiará la eficiencia teórica y práctica, con ayuda de los resultados de ensayos realizados en laboratorio, para definir los factores que afectan a la eficiencia y cuáles son los valores que adopta.

La segunda parte se centrará en analizar el funcionamiento del controlador. Se obtendrán los parámetros sobre los que debe actuar ese controlador en función del tipo de motor eléctrico (ya sea un motor de corriente continua o de corriente alterna) a través del análisis teórico de cada tipo de motor. Se verán los tipos de control más adecuados y los circuitos electrónicos que se deben implementar para realizar ese control. Por último, se analizará la eficiencia del controlador a nivel teórico así como los factores que le afectan.

En la tercera parte se tratará el tema de los motores eléctricos. Se estudiará brevemente su clasificación y el funcionamiento de cada uno de ellos, bien sea de corriente continua o de corriente alterna, para finalizar con un estudio sobre su eficiencia. En este estudio se analizarán aspectos como los métodos de determinación de la eficiencia, la normativa existente sobre medición y valores de eficiencia mínimos permitidos en el mercado así como los factores que afectan a la eficiencia en cada tipo de motor.

La cuarta parte incluye un análisis del sistema de transmisión. Inicialmente se indican los sistemas de transmisión más usuales así como un estudio teórico de cada uno para concluir con el análisis de la eficiencia y de los parámetros que le afectan.

En la quinta y última parte, se detallará el elemento final de la cadena energética estudiada, que es la rueda. De ella se identificarán las distintas partes que la componen para analizar en que se basa su eficiencia y que parámetros le afectan.

2. PARTE I: BATERÍAS

2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BATERÍAS

El funcionamiento de una batería [7] está basado esencialmente en un proceso reversible llamado reducción-oxidación (también conocida como redox). Este es un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones). Es decir, es un proceso cuyos componentes no resultan consumidos ni se pierden, sino que meramente cambian su estado de oxidación, y, a su vez, pueden retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante la carga.

Una batería está formada por la unión, en serie o paralelo, de celdas. Esta agrupación es debido a que la diferencia máxima de potencial que se puede obtener de una de estas celdas es insuficiente para su uso práctico.

Una de estas celdas consta, independiente del tipo de acumulador que se considera y de la geometría que posea, de los siguientes componentes:

- **Ánodo:** Es aquel electrodo donde ocurre la reacción de oxidación, pérdida de electrones.
- **Cátodo:** Es el electrodo donde ocurre la reacción de reducción, ganancia de electrones.
- **Separador:** Este material permite ubicar los electrodos lo más próximos posible pero impide que los mismos estén en contacto directo, puesto que esta situación provocaría que reaccionaran directamente sin posibilidad de aprovechar esa energía. Se construyen de un material inerte y poroso que permita el flujo de electrolito.
- **Electrolito:** Es un componente importante puesto que esta solución permite la conducción iónica en el interior de la batería y contiene reactivos y productos de los procesos electroquímicos. En algunos casos el electrolito se encuentra embebido formando una pasta, como en el caso de la lipa seca, inmovilizado como en las baterías tipo gel, o en

forma líquida como en el caso de las baterías alcalinas (solución de KOH) o en las de plomo ácido (solución de H_2SO_4).

- Contenedor: Se construyen de materiales resistentes al ataque químico de los componentes y aportan resistencia mecánica al acumulador.

Existen infinidad de tipos de baterías en función del material del que están hechos los electrodos y el electrolito. Cada material posee una fuerza electromotriz distinta, determinada por su capacidad para conducir la corriente eléctrica desde el interior al exterior de la celda.

Para no hacer un estudio de eficiencias muy extenso respecto a las baterías, en este proyecto sólo se van a considerar dos tipos: las tipo ion litio y las baterías de polímero de litio.

2.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA BATERÍA

En una batería, lo más importante no es el funcionamiento interno sino una serie de parámetros que caracterizan a las baterías y que permiten conocer con mayor exactitud el punto de operación óptimo de un sistema en específico. Además, estos parámetros ayudan a comparar las distintas tecnologías.

Las características más importantes de las baterías son [8]: el voltaje nominal, la capacidad de carga/descarga, la potencia, la energía almacenada, la energía específica, la tasa de auto descarga, la eficiencia, la temperatura de operación y la vida útil.

2.2.1. VOLTAJE NOMINAL

Es un fenómeno físico por el cual se produce el impulso de los electrones a través de un conductor en un circuito eléctrico cerrado provocando un flujo de corriente.

Cuando una batería está entregando corriente, el voltaje cae mientras que cuando esa misma batería está siendo cargada, el voltaje aumenta.

La corriente circula desde un punto de mayor potencial a otro de menor. Esto se puede deducir aplicando la conocida Ley de Ohm, la cual afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico

es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre dos puntos e inversamente proporcional a la resistencia. La expresión matemática de la esta ley es:

$$I = \Delta V / R \quad (2.1)$$

Para una batería, el cálculo de la tensión nominal se puede expresar en función de su resistencia interna (R_i). La resistencia interna es un concepto que ayuda a modelizar eléctricamente las reacciones químicas que suceden dentro de la batería. Cuando una corriente fluye a través de una celda, la tensión de salida es menor que cuando no hay corriente suministrada por la celda, esto ocurre gracias a la presencia de la resistencia interna de la batería. Este valor de resistencia interna no se puede medir directamente sobre la pila si no que hace falta colocar en serie otra resistencia (R_c), de valor muy pequeño ya que la interna también lo tiene, y aplicar una corriente. De esta forma, y aplicando la siguiente ecuación, se puede calcular ese valor de resistencia interna:

$$R_i = (V/I) - R_c \quad (2.2)$$

La resistencia interna de las baterías va aumentando a medida que la celda se descarga, en parte, debido a la acumulación de productos secundarios de las reacciones y al calor que desprende la reacción química. En la figura 2 se ilustra el voltaje de los terminales de una celda bajo determinadas condiciones de carga. Los vehículos eléctricos requieren que la resistencia interna de sus celdas sea la más pequeña posible, de ésta forma el voltaje que demanda el vehículo coincidirá con el que generan las baterías [9].

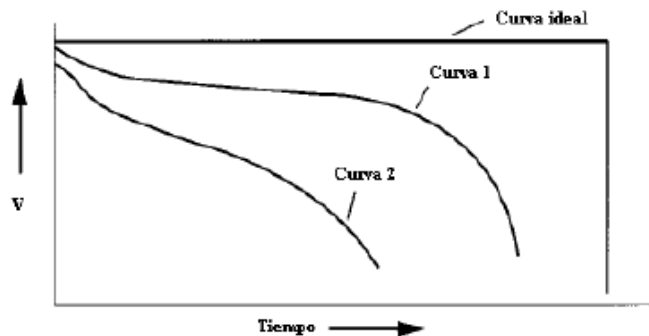


Figura 2. Curvas de una batería de voltaje vs tiempo. [9]

2.2.2. CAPACIDAD DE CARGA/DESCARGA

A medida que la corriente de descarga aumenta, las pérdidas en el circuito se van maximizando (generalmente por el aumento de temperatura), los efectos de polarización aumentan, el voltaje de operación disminuye y la vida útil de la batería se reduce. Cuando las corrientes de descarga son lo suficientemente bajas, el voltaje de operación coincidirá con el voltaje real o teórico y la capacidad tendrá un valor muy cercano al calculado. En la figura 3 se muestran varias curvas de capacidad de carga/descarga cuando la batería se descarga a diversas intensidades a temperatura ambiente (25 °C).

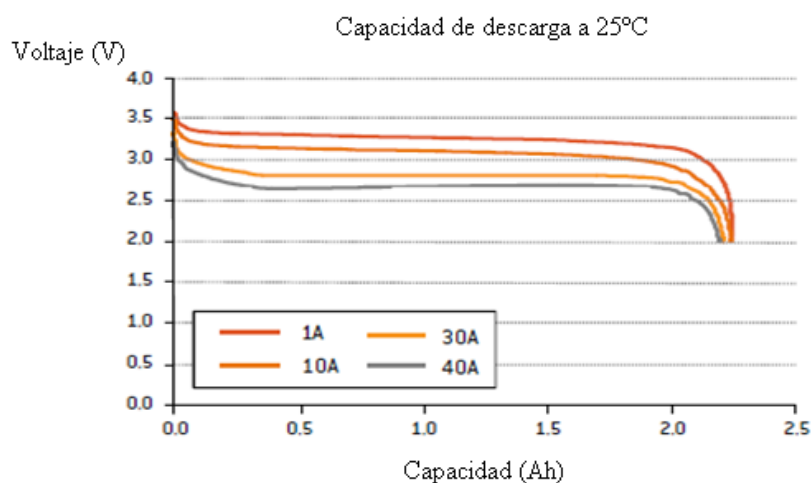


Figura 3. Curvas de una batería de Li-ion a diversas intensidades de descarga a temperatura constante. [10]



Para obtener las corrientes de carga y descarga de una celda es necesario tener en cuenta la siguiente expresión matemática [9]:

$$I = M * C_n \quad (2.3)$$

donde:

- I es la corriente de descarga en Amperios (A)
- C es la capacidad de carga nominal de una celda en amperios-hora (Ah).
- n es el tiempo en horas para el cual dicha capacidad es reportada (h)
- M es la fracción de C.

Un C es la cantidad de corriente que circula en una celda por hora. Tiene unidades de 1/h, es decir, cuando una de estas celdas tiene una capacidad de 1500mAh y se carga o descarga a 1C, la celda tendrá una capacidad equivalente a 1500 mA que es igual a 1.5 A. Una corriente de carga/descarga de 10A para una batería cuya capacitancia nominal es de 10Ah, se refiere a una corriente de 1C. Igualmente, una corriente de carga/descarga de 25mA para una celda de 100mAh es una corriente de 0.4C. En ocasiones, es muy común malinterpretar el concepto de capacidad nominal, es decir, si una batería posee una capacidad nominal de 10 Ah, no significa que pueda o deba entregar 1A por 10 h, 10A por 1h o 20A por 0.5h, ya que mientras mayor sean las corrientes de carga, la energía disponible en la salida será menor. La figura 4 demuestra que la capacidad de una celda varía en función del tiempo empleado en descargarla (también depende de la magnitud de la corriente de descarga). [10]

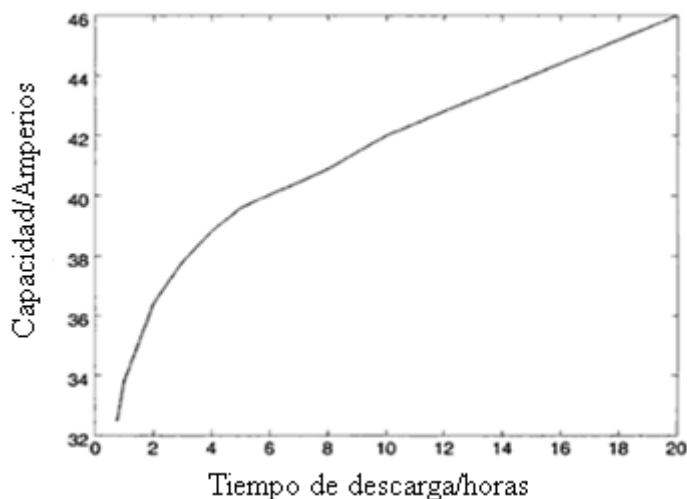


Figura 4. Cambios en la capacidad de la batería frente al tiempo de descarga. [8]

2.2.3. POTENCIA

La potencia eléctrica es la relación de transferencia de energía por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. Cuando se trata de corriente continua (CC) la potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un dispositivo, es el producto de la diferencia de potencial entre los dos terminales (V) que posee y la intensidad de corriente (I) que pasa a través del dispositivo. Es decir, la potencia es proporcional a la tensión y a la intensidad, tal como se demuestra a continuación:

$$P = V * I \quad (2.4)$$

2.2.4. ENERGÍA ALMACENADA

La energía almacenada en una celda depende directamente de la tensión y de la carga almacenada en la misma. En el caso de las baterías, se utiliza la unidad Vatio-hora que corresponde a la energía

equivalente que genera un Vatio en una hora. El vatio-hora equivale a 3600 Julios y es compatible con el término de Amperio-hora de carga, tal como se muestra en la fórmula expresada a continuación:

$$E = V * I \quad (2.5)$$

2.2.5. ENERGÍA ESPECÍFICA

La energía específica es la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada kilogramo de masa de la batería. Tiene unidades de Wh/Kg. Una vez que se conoce la capacidad energética que requiere el vehículo y la energía específica de la batería, se puede determinar fácilmente la masa de la batería. Este valor es solo una guía, ya que la energía almacenada varía en función de factores tales como la temperatura y la tasa de descarga.

En la figura 5 se reflejan los valores de densidad de energía por unidad de masa (kilogramo) y por unidad de volumen (litro) de varias baterías de distintas tecnologías. Se puede ver que las baterías de ion-litio y de litio-polímero son las más energéticas llegando a valores de entre 150 y 200 Wh/kg mientras que otras tecnologías como las de níquel-cadmio, sólo alcanzan los 50 Wh/kg.

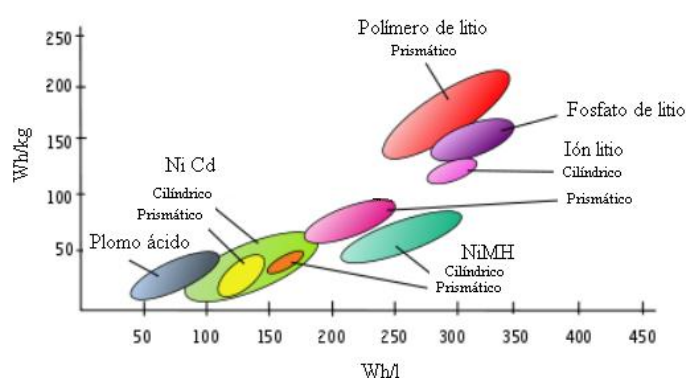


Figura 5. Densidad de energía por masa y volumen. [11]

2.2.6. TASA DE AUTO-DESCARGA

El fenómeno de auto-descarga sucede cuando aumenta rápidamente la actividad electroquímica en el interior de la celda y acelera su descarga, lo cual produce una pérdida en la capacidad. Cuando una batería es guardada o almacenada, ésta se descarga progresivamente aunque no se use. Existen muchas razones por las cuales una batería puede auto-descargarse, la más importante es la temperatura. Generalmente, cuando una celda trabaja a temperaturas extremas (especialmente bajo 0 °C) suele aumentar su nivel de auto-descarga, ya que la reacción química interna se ve afectada por las temperaturas externas lo cual evita que su carga sea de un 100 %. Lo mismo pasa cuando la batería es guardada en un lugar con altos niveles de humedad. La tasa de auto-descarga varía según el tipo de química presente en la batería.

2.2.7. CICLO DE VIDA

Aunque el ciclo de vida es un concepto estrechamente relacionado con otros como la vida útil, la tasa de auto-descarga o la eficiencia, entre otros, hasta el punto de ser conceptos superpuestos, es interesante hablar separadamente del ciclo de vida de una batería.

Es difícil calcular los ciclos de vida de las baterías ya que dependen de muchos factores. Algunos de los factores son el mantenimiento, el porcentaje de descarga, temperatura de la batería, cantidad de veces que se descarga, vibración, etc.

Uno de los factores más importantes es la cantidad (en porcentaje) de descarga de la batería por ciclo (en inglés Depth of Discharge cuyas siglas son DOD). Cuando la cantidad de DOD es incrementada por ciclo, resulta en una reducción del total de ciclos de la batería.

A continuación se ilustra un ejemplo de un fabricante de baterías, Kokam, que estudió las características del ciclo de vida de una batería de polímero de litio [12].

En general, la capacidad de la batería disminuye a medida que se producen ciclos de carga y descarga. Al principio, la capacidad de la batería ensayada eran 1000 mAh, sin embargo, tras producirse ciclos de carga y descarga en varias ocasiones, se redujo a 980, 950, 900 mAh gradualmente.

El ciclo de vida es un indicador de rendimiento, los resultados del ensayo de Kokam sobre varias baterías de polímero de litio se reflejan en las siguientes gráficas (figuras 6 a 8):

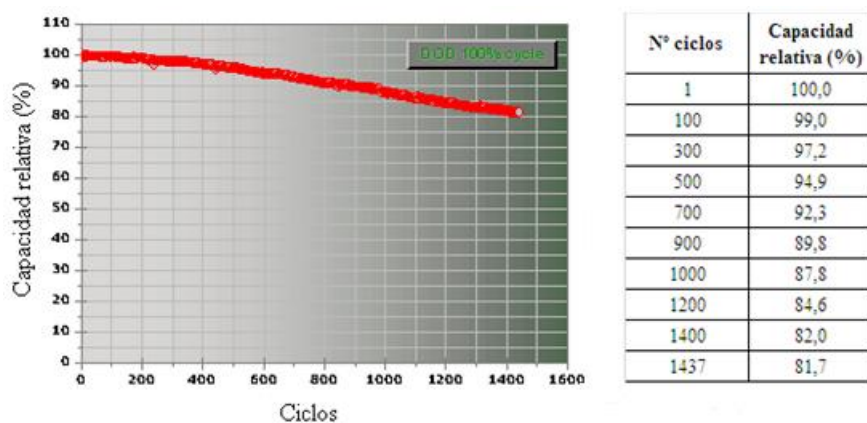


Figura 6. Características del ciclo de vida de una batería con un 100% de profundidad de descarga (DOD). [12]

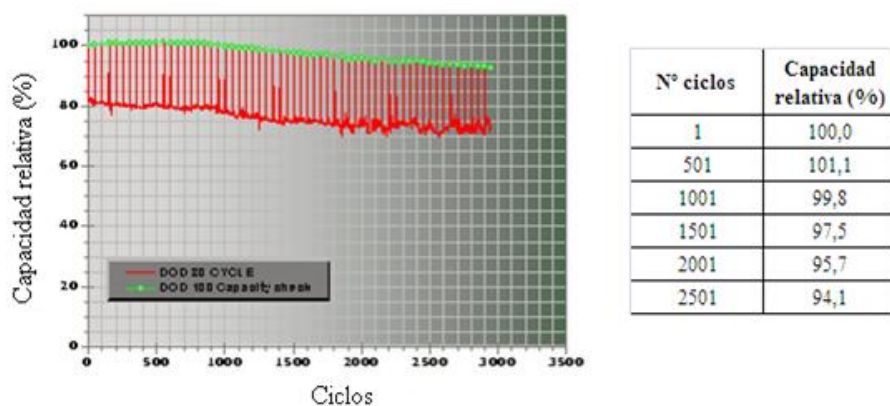


Figura 7. Características del ciclo de vida de una batería con un 80% de profundidad de descarga (DOD). [12]

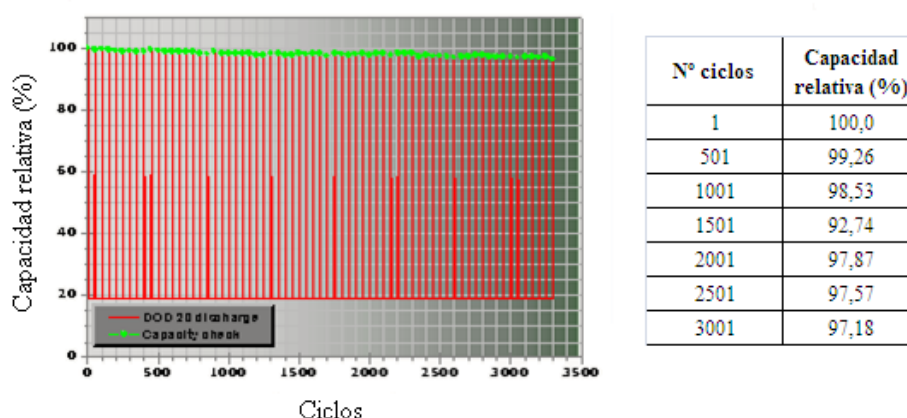


Figura 8. Características del ciclo de vida de una batería con un 20% de profundidad de descarga (DOD). [12]

En la figura 6 se puede ver como se reduce la capacidad de la batería hasta un 81,7% cuando se la somete a un número mayor de 1400 ciclos de descarga de un 100% de profundidad. En la figura 7 se muestran los resultados de la batería sometida a más de 2500 ciclos de descarga al 80% de profundidad, reduciéndose la capacidad a un 94,1%. Por último, tenemos una batería sometida a más de 3000 ciclos con una profundidad del 20%, por lo que la capacidad pasa a ser del 97,18%, estos resultados se muestran en la figura 8.

2.2.8. TEMPERATURA

La temperatura es un factor que afectan mucho a las características de una batería. A medida que la temperatura de operación de la batería disminuye, su resistencia interna aumenta y la actividad química en su interior se reduce. Esto influye notablemente en el voltaje de descarga y en la vida útil de la batería.

Cuando la temperatura disminuye, provoca una reducción en la capacidad neta de la celda y un incremento en la pendiente del voltaje en función del tiempo. Los fabricantes recomiendan trabajar en un rango entre 20 °C a 40 °C, para que la resistencia interna disminuya y el voltaje, junto con la energía disponible, aumente. La figura 9 muestra la curva de una batería de Li-ion a diversas temperaturas.

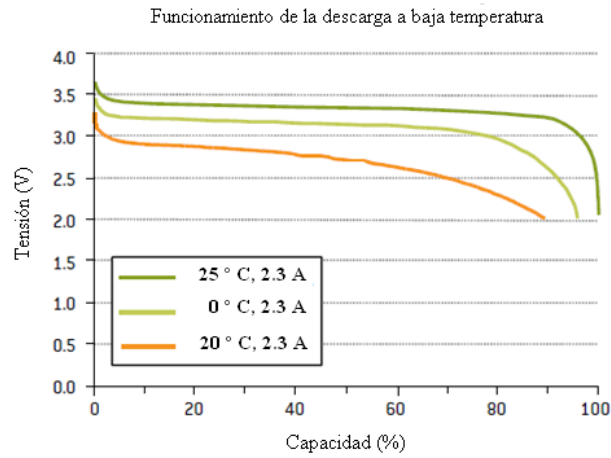


Figura 9. Influencia de la temperatura en las curvas de descarga de la batería Li-ion. [10]

2.2.9. EFICIENCIA

El concepto de eficiencia expresa la relación que existe entre la energía, o potencia, que sale, con la energía, o potencia, que entra a un elemento.

Para el caso de las baterías, esta eficiencia depende notablemente del valor de resistencia interna (R_i) que se determina por medio de ensayos y la colocación de una pequeña resistencia de carga (R_c), tal y como se indica en la siguiente ecuación matemática [8]:

$$\eta(\%) = \frac{1}{1 + R_i/R_c} \quad (2.6)$$

Además, también se puede expresar en términos de potencias tal y como se expresa en la siguiente ecuación [8]:

$$\eta(\%) = \frac{(P_{ent} - P_{perd})}{P_{ent}} * 100 \quad (2.7)$$

donde:

P_{ent} es la potencia proporcionada por la batería.

P_{perd} es la potencia que disipa la batería en forma de calor.

2.2.10. VIDA ÚTIL

La vida útil de una batería se define como el número de ciclos de carga/descarga que es capaz de soportar manteniendo buenas condiciones de funcionamiento.

Cada tipo de batería tienen una vida útil determinada asociada a la química en la que están basadas pero, además, esa vida útil puede verse afectada por parámetros externos tales como: temperatura, descargas pico (a grandes intensidades de corriente), efecto memoria y pasivación (en aquellas baterías que lo presentan), entre otros. En la figura 10 se muestra como la temperatura afecta directamente en los ciclos de carga/descarga y como disminuye la capacidad de descarga de la celda.

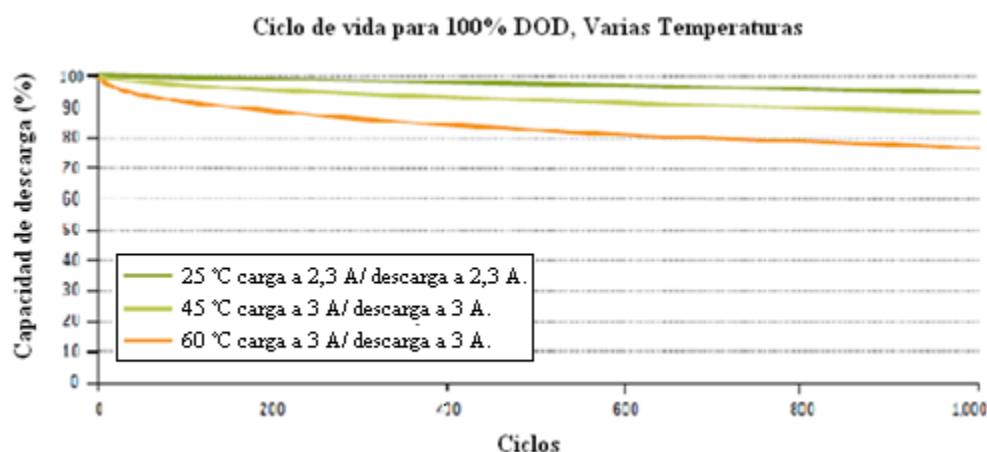


Figura 10. Influencia de la temperatura en la vida útil de una batería de ion litio. [10]

En relación con la temperatura, ambientes a alta temperatura tanto en uso como en almacenaje, disminuye la vida útil de la batería. En las baterías de litio, por ejemplo, no se deben sobrepasar los 60 °C durante el manejo y la carga.

En cuanto al nivel de carga, se deben evitar ciclos frecuentes y completos de carga/descarga ya que generan estrés en la batería. Sólo es aconsejable realizar un ciclo completo de este tipo cada 30 ciclos de descarga parcial.

Además, hay que evitar guardarla a carga completa o descargada. El nivel de carga recomendado para el almacenaje es del 40%.

Relativo al envejecimiento se puede decir que es un proceso de degradación química que provoca una disminución de la vida útil de la batería. Un uso bajo las condiciones idóneas retardará el envejecimiento.

El efecto de la pasivación [13] se refiere, en su sentido más amplio, a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. Aunque la reacción entre el metal y el agente externo sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasivante no permite que éstos puedan interactuar, de tal manera que la reacción química o electroquímica se ve reducida o completamente impedida. Si la batería usada sufre los efectos de la pasivación se producirá una disminución de su vida útil.

Es un fenómeno similar al efecto memoria, del que se hablará a continuación, que únicamente afecta a las baterías con base de litio en su composición. La pasivación se produce cuando una batería sufre un largo periodo de inactividad o se le habitúa a recibir cargas pequeñas en cuanto a duración, lo que evidentemente repercute en su nivel de capacidad.

Se podría entender como una especie de resistencia interna de la batería, ya que se trata de una fina película de Cloruro de Litio (LiCl) que se forma sobre la superficie del ánodo que puede hacer caer el voltaje de la batería por debajo del necesario para el funcionamiento del dispositivo móvil al que dan servicio.

Sin embargo puede resultar incluso beneficiosa al evitar la auto-descarga de la batería, ya que si la capa aún es fina desaparecerá conforme ésta se usa de forma habitual.

Y, por último, el efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías con cargas incompletas. Se produce cuando se carga una batería sin haber sido descargada del todo: se crean unos cristales en el interior de estas baterías, a causa de una reacción química al calentarse la batería, bien por uso o por las malas cargas. Para prevenirlo no hace falta esperar a descargar totalmente la batería antes de realizar una carga, basta con que una de cada pocas cargas sea completa.



Las baterías que sufren en mayor grado el efecto memoria son las baterías de Ni-Cd y las Ni-MH mientras que las baterías de plomo y ácido y las baterías de iones de litio las sufren en menor medida.

También en las baterías sin efecto memoria se recomienda realizar un ciclo carga/descarga completo de vez en cuando.

Las baterías de Li-Po, sin embargo, no se pueden descargar por debajo de un cierto voltaje, por seguridad, y las condiciones de carga son también delicadas debido a la seguridad, sin embargo son las que más energía almacenan por peso y tienen menos efecto memoria.

Otras baterías no químicas tampoco tienen ningún efecto memoria, como las baterías inerciales o los condensadores de alta capacidad.

2.3. TIPOS DE BATERIAS

La variedad de químicas de las baterías que hoy en día se encuentran en el mercado es muy extensa. Existen baterías de plomo ácido, muy usadas en la actualidad por su bajo precio y madurez tecnológica, baterías de níquel-cadmio, menos usadas actualmente por su alto poder contaminante y su gran efecto memoria, baterías de níquel-hidruro metálico, de alta energía específica y alto efecto memoria, etc.

Las baterías de las que se van a especificar sus características así como sus ventajas e inconvenientes, son las basadas en litio. Más concretamente se hablará de las de ión litio y de las de polímero de litio.

2.3.1. BATERÍAS DE IONES DE LITIO (LI-IÓN)

Las baterías de ión-litio (también llamadas Li-ion) están construidas a base de un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, óxido de manganeso o sulfuro metálico sumergidos en un electrolito de sal de litio.

Su elevada capacidad energética, ligereza de los componentes, resistencia a la descarga y su capacidad para operar a elevados ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores pequeños, ligeros, de diversas formas y con alto rendimiento.

La figura 3 indica esquemáticamente el funcionamiento a nivel atómico de este tipo de baterías.

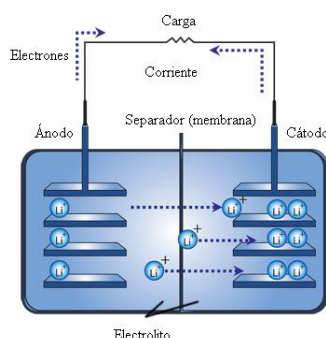


Figura 11. Mecanismo de carga/descarga de una batería de ión litio. [15]

➤ Ventajas

Las baterías basadas en esta tecnología ofrecen varias ventajas:

- Una elevada densidad de energía: Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen. El litio es el metal más ligero y esto da lugar a una alta capacidad específica (figura 12), lo que permite obtener la misma energía con un peso muy inferior (figura 13).
- Poco peso: A igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que las de tipo Ni-MH y mucho menos que las de Ni-Cd y Plomo.
- Gran capacidad de descarga: Algunas baterías de Li-ión, las llamadas "Lipo", que hay en el mercado, se pueden descargar totalmente en menos de dos minutos.
- Poco espesor: Se presentan en placas rectangulares, con menos de 5 mm de espesor. Esto las hace especialmente interesantes para integrarlas en dispositivos portátiles que deben tener poco espesor.
- Alto voltaje por célula: Cada batería proporciona 3,7 voltios, lo mismo que tres baterías de Ni-MH o Ni-Cd (1,2 V cada una).

- Carecen de efecto memoria.
- Descarga lineal: Durante toda la descarga, el voltaje de la batería varía poco, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto es una ventaja, ya que hace muy fácil saber la carga que almacena la batería.
- Larga vida en las baterías profesionales para vehículos eléctricos. Algunos fabricantes muestran datos de más de 3.000 ciclos de carga/descarga para una pérdida de capacidad del 20% a C/3.
- Baja tasa de auto-descarga: Cuando guardamos una batería, ésta se descarga progresivamente aunque no la usemos. En el caso de las baterías de Ni-MH, esta auto-descarga puede suponer más de un 20% mensual. En el caso de Li-ion es de menos un 6% en el mismo periodo. Mucha de ellas, tras seis meses en reposo, pueden retener un 80% de su carga.

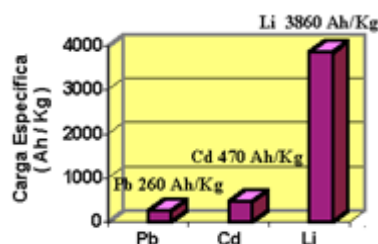


Figura 12. Carga específica para distintos ánodos. [15]

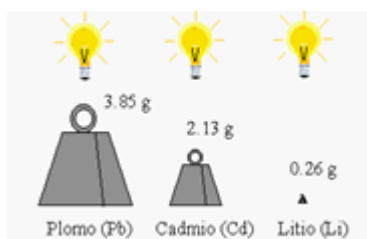


Figura 13. Masa necesaria para producir 1 A durante 1 hora. [15]

➤ Inconvenientes

A pesar de todas sus ventajas, esta tecnología no es el sistema perfecto para el almacenaje de energía, pues tiene varios defectos, como pueden ser:

- Duración media: Depende de la cantidad de carga que almacenen, independientemente de su uso. Tienen una vida útil de unos 10 años o más si se almacenan con un 40% de su carga máxima.
- Soportan un número limitado de cargas: entre 300 y 1000, menos que una batería de Ni-Cd e igual que las de Ni-MH.
- Son costosas: Su fabricación es más costosa que las de Ni-Cd e igual que las de Ni-MH, si bien actualmente el precio baja rápidamente debido a su gran penetración en el mercado, con el consiguiente abaratamiento.
- Pueden sobrecalentarse hasta el punto de explotar: Están fabricadas con materiales inflamables que las hace propensas a detonaciones o incendios, por lo que es necesario dotarlas de circuitos electrónicos que controlen en todo momento la batería.
- Peor capacidad de trabajo en frío: Ofrecen un rendimiento inferior a las baterías de Ni-Cd o Ni-MH a bajas temperaturas, reduciendo su duración hasta en un 25%.

2.3.2. BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO (LI-PO)

Es una batería recargable que evolucionó a partir de las baterías de ión litio donde el electrólito de sales de litio ya no se encuentra en una solución orgánica sino en un polímero compuesto sólido.

Más concretamente, el electrolito es una solución de sales de litio en un polímero sólido o gelatinoso, el ánodo es de carbono y el cátodo es un óxido metálico.

Sus características son muy similares a las baterías de ión litio pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes por lo que su uso se está extendiendo. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración.

➤ Ventajas:

Las principales ventajas de este tipo de batería son las siguientes:

- Mayor densidad de energía en comparación a las NiCd, NiMH u otras baterías.

- Tamaño más reducido respecto de otras baterías.
- Bajo peso: A modo de comparación, el peso de una batería Lipo de 7,5 V y 5 A son 220 gramos mientras que el peso de una batería de plomo de 6 V para 5 A son más de 600 gramos.
- Flexibilidad de forma: Los fabricantes pueden obtener formas más eficientes en cuanto a su aplicación.
- Relación de auto-descarga menor.
- Tiempos de funcionamientos más largos.
- Al igual que en el resto de baterías, no es posible aprovechar el 100% de la carga almacenada. Esto normalmente se nota más en el resto de baterías que en las tipo Lipo pero en estas también ocurre. La capacidad que podemos aprovechar dependerá de la potencia y de la velocidad con que queramos sacar esa capacidad, lógicamente a mayor potencia mas podremos aprovechar. Y a menor velocidad (tiempos de funcionamiento largos) mayor será la capacidad que podremos utilizar. Para aclarar este punto se pueden observar estas gráficas:

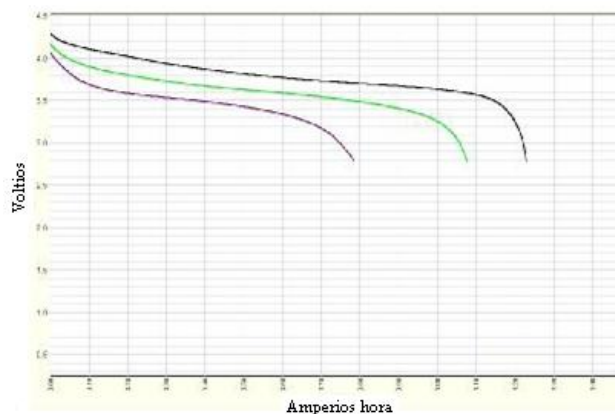


Figura 14. Curvas de aprovechamiento de las baterías. [16]

En la figura 14 se puede ver que a una misma batería con unas descargas constantes la primera (negra) de 2A es posible sacar el 100% de la capacidad nominal en una descarga a 4A (verde) es posible sacar un 90% y a 6A (morada) un 75% de su capacidad.

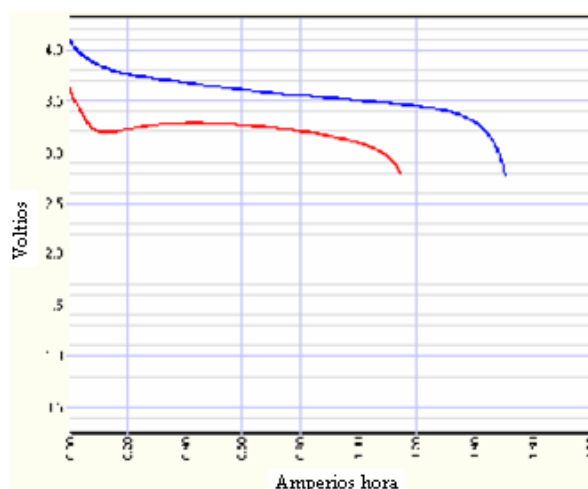


Figura 15. Comparación entre descargas de baterías. [16]

En la figura 15 se comparan dos baterías de diferente potencia y similar capacidad, la curva roja corresponde a una descarga de una batería con una potencia máxima de $6 C^{(*)}$ y la curva azul a una batería con una descarga máxima de $10C$. Como se puede ver ante una descarga de igual intensidad, 9A la batería más potente es capaz de descargar al menos un 20% más que la de menor potencia.

*NOTA: C tiene el valor 1/h, por ejemplo una descarga a $7C$ es simplemente $7 \times \text{Capacidad} \times C$. Para una batería de 1050mAh será entonces: $7 \times 1050 \text{ mAh} \times 1/h = 7350 \text{ mA} = 7,35 \text{ A}$.

➤ Inconvenientes:

Dentro de los inconvenientes podemos destacar:

- Mayor riesgo de incendio que sobreviene por la muy elevada densidad de energía que posee. El fuego surge debido al contacto entre el litio y el oxígeno en el aire. No necesita ninguna otra fuente de provocación o combustible para encenderse y quema casi explosivamente.
- Necesidad de extremar la precaución en su uso.
- Carga a valores de tensión o corriente concretos ya que fuera de estos valores reduciría la vida útil.

- Cuidado especial de no cortocircuitar la batería ya que provocaría la fusión del conductor.
- Electrolito peligroso al contacto con el cuerpo humano.
- Aunque las baterías Lipo son más ecológicas al no contener metales pesados, para deshacerse de este tipo de baterías se deben seguir unos pasos concretos: deben ser descargadas completamente, sumergidas en un recipiente lleno de agua saturada con sal normal hasta medir una tensión de 0V para, por último, ser desechada en un contenedor específico para pilas.
- Almacenamiento a media carga y nunca por debajo de 0°C ya que se destruirían.

2.4. COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS BASADAS EN LITIO

Debido a que en el proyecto sólo se van a hablar de dos tipos de baterías y ambas basadas en litio, se va a realizar una comparativa en cuanto a las principales características.

Esta comparativa se recoge en la tabla 3:

Tecnología Características	Ión litio	Litio polímero
Ánodo	Carbón	Carbón
Electrolito	Líquido	Poli-electrolito
Cátodo	Óxido metálico ($\text{LiCoO}_2, \text{LiNiO}_2, \text{LiMn}_2\text{O}_4$)	Óxido metálico (LiCoO_2 , $\text{LiNiO}_2, \text{LiMn}_2\text{O}_4$)
Tensión nominal	3,7 V	3,7 V
Densidad de energía / Energía específica (Wh/kg)	Alta / 100-160	Alta / 100-130

Tecnología Características	Ión litio	Litio polímero
Ciclo de vida(para mantener el 80% de su capacidad inicial)	Excelente / 500-1000 ciclos	Bueno / 500 ciclos
Bajas temperaturas	Bueno	Medio
Auto descarga (%/mes)	10	10
Seguridad	Mala	Media
Tiempo carga rápida (horas)	2-4	2-4
Flexibilidad-Tamaño	Mala	Buena

Tabla 3. Comparativa de las diferentes baterías basadas en litio. [17] [18]

A la vista de la tabla anterior podemos ver que son tipos de pilas muy similares en cuanto a parámetros como las características constructivas, la tensión nominal, la densidad de energía, la energía específica, la tasa de auto-descarga y el tiempo de carga rápido.

Factores que las diferencian son la seguridad y el tamaño. Mientras que las baterías de ion litio tienen problemas de seguridad y son más grandes, las tipo polímero ion son más seguras y de tamaño más reducido.

2.5. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS BATERÍAS

Se considera como eficiencia a la relación entre la energía entregada ante un requerimiento y la energía necesaria para llevar a la batería al estado inicial que tenía antes de satisfacer dicha demanda.



Este valor de eficiencia puede expresarse de dos maneras, en amperios-hora o en vatios-hora, según si se habla en criterios de requerimientos de corriente o de potencia.

Los fabricantes que ofrecen este tipo de productos dan un valor optimista de eficiencia en el que fijarse.

La verdadera prueba de eficiencia de una batería sólo puede hacerse realizando una descarga bajo control y registrando los valores obtenidos imponiendo una serie de condiciones de contorno para estudiar la influencia de las distintas variables sobre los resultados.

A continuación se va a proceder a analizar la eficiencia teórica de una batería de polímero de litio para terminar comparándolo con un estudio práctico de cuantificación de esa eficiencia.

Este trabajo de realización de experimentos, obtención de datos y análisis de los mismos no se realiza en este proyecto pero si se utilizan los estudios existentes sobre este tema, en otros proyectos fin de carrera para obtener conclusiones sobre ello.

A continuación se exponen los distintos factores que influyen en la eficiencia de una batería y de qué forma lo hacen.

2.5.1. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA DE LAS BATERÍAS

Son numerosos los factores que afectan a la eficiencia de las baterías. Las baterías sometidas a estudio en este proyecto, como se mencionaba en puntos anteriores, son las de ión litio y las de polímero de litio.

La influencia de estos parámetros sobre la eficiencia se basa en que, por su acción, la energía suministrada a la carga es menor que la energía generada en la batería.

Entre los factores más importantes que afectan a la eficiencia de las baterías en general se encuentran los siguientes [19]:

- **Acción Local**

Este término es utilizado para denominar a las pérdidas internas que se producen cuando una batería está a circuito abierto. Esta descarga se debe a la acción química local entre las partes componentes de



las placas, y especialmente, de las negativas. El material activo negativo y el de la rejilla reacciona con el electrolito como una celda produciendo una auto-descarga. Todo tipo de impurezas aumentan la resistencia interna de la rejilla, por lo que se debe tener especial cuidado en lo que se utiliza, ya que esta puede agregar al sistema componentes que producen auto-descargas.

El grado de acción local, puede ser expresado tanto por la pérdida en porcentaje mensual de capacidad en el circuito abierto, como por la cantidad de corriente requerida en carga a flote o de mantenimiento para mantener la batería totalmente cargada. Esto como otros parámetros varían con la temperatura, siendo mayor a temperaturas más elevadas.

- **Temperatura**

La temperatura tiene una elevada influencia en varios parámetros que define el funcionamiento de la batería.

En cuanto a lo práctico, la temperatura operativa de una batería debería estar preferentemente en una escala de entre 15 a 27 °C. Temperaturas más elevadas otorgan temporalmente una capacidad superior, pero reducirá la vida útil de la batería.

Temperaturas mayores de 52°C o más pueden dañar algunos componentes de la batería y causar fallos prematuros.

Las bajas temperaturas por el contrario, reducen la capacidad de la batería, pero prolongan la vida útil de la misma bajo operaciones en vacío o en condiciones de almacenamiento. Las muy bajas temperaturas podrán congelar el electrolito, pero sólo si la batería está descargada o sea con baja densidad.

La tabla 4 que se muestra a continuación suministra las distintas correcciones de densidad para algunas temperaturas dadas:

Temperatura (°C)	Densidad	Densidad corregida
20	1100	1080

Temperatura (°C)	Densidad	Densidad corregida
10	1150	1130
0	1185	1160
-10	1210	1180
-20	1235	1200
-30	1250	1215
-40	1265	1225

Tabla 4. Densidad de carga de una batería para distintas temperaturas.

- **Resistencia interna**

La resistencia interna [8] es un concepto que ayuda a modelar las consecuencias eléctricas de las complejas reacciones químicas que se producen dentro de una batería. Es imposible medir directamente la resistencia interna de una batería, pero ésta puede ser calculada mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. Así, cuando a una batería se le aplica una carga, la resistencia interna se puede calcular mediante cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$R_c = \left(\frac{V_s}{I} \right) - R_L \quad (2.8)$$

$$R_c = \left(\frac{V_s - V}{I} \right) \quad (2.9)$$

donde:

R_c es resistencia interna de la batería.

V_s es voltaje de la batería en vacío.



V es voltaje de la batería con la carga.

R_L es resistencia de la carga.

I es intensidad suministrada por la batería.

La resistencia interna varía con la edad de la batería, pero en la mayoría de baterías comerciales la resistencia interna es del orden de los $m\Omega$.

Para determinar la resistencia interna de una batería se han desarrollado tres métodos básicos de prueba: Método DC, Conductancia AC y Espectroscopia de impedancia electroquímica de frecuencia múltiple (EIS). [14]

La obtención de la medida de resistencia interna de una fuente nos indica la capacidad de la batería para suministrar energía, facilita información útil para detectar problemas e indicar cuando una batería debe ser reemplazada. Sin embargo, la resistencia únicamente no posee una relación lineal con la capacidad de la batería. El incremento de la resistencia interna solamente se relaciona con el envejecimiento y brinda algunas indicaciones de posibles fallos.

Cuando se realiza una medición de la resistencia interna de un mismo conjunto de celdas nuevas, es común notar una variación del valor de esta resistencia en un 8 %. El proceso de fabricación y los materiales utilizados son solamente dos de las variables que contribuyen a dicha variación. En vez de basarse en una lectura absoluta de resistencia, los técnicos de servicio toman una instantánea de la resistencia de las celdas cuando se instala la batería y luego miden las pequeñas variaciones a medida que las celdas envejecen. Un aumento de resistencia del 25 % indica una caída de rendimiento de aproximadamente un 80 %.

Antes de analizar los diferentes métodos de análisis, se va a explicar brevemente lo que significa resistencia interna e impedancia, términos que se usan frecuentemente de forma incorrecta cuando se habla de la conductividad de una batería.

La resistencia es puramente resistiva y no tiene reactancia. No existe desfase entre tensión y corriente, es decir ambas van en fase. Un radiador es una carga resistiva pura de ese tipo. Funciona igualmente bien con corriente continua (DC) y con corriente alterna (AC).

La mayoría de las cargas eléctricas, incluyendo la batería, contienen una componente de reactancia. La parte reactiva de la carga varía con la frecuencia. Por ejemplo, la reactancia capacitiva o capacitancia de un condensador disminuye a medida que la frecuencia aumenta. Un condensador es un circuito abierto para señales DC, es decir no puede pasar la corriente a través de él. Por el contrario una inductancia pura actúa en la dirección opuesta y su reactancia aumenta a medida que la frecuencia aumenta. Una bobina o inductancia pura es un cortocircuito para señales DC. Una batería combina la resistencia óhmica, así como la reactancia capacitiva e inductiva. El término impedancia engloba los tres tipos.

La batería puede verse como un conjunto de elementos eléctricos. La figura 16 ilustra el modelo básico de Randles para baterías como un circuito equivalente con resistencias y condensadores (R_1 , R_2 y C). La reactancia inductiva normalmente se omite porque juega un rol imperceptible en una batería a bajas frecuencias.

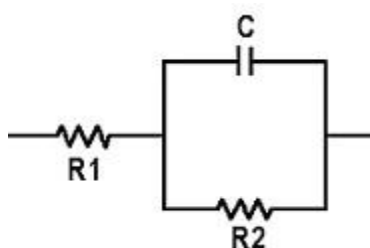


Figura 16. Modelo Randles de una batería.

A continuación se exponen en qué consisten los distintos métodos de medida de resistencia interna antes mencionada así como sus factores favorables y sus limitaciones.

Es importante saber que cada método provee una lectura de resistencia interna diferente cuando se mide en la misma batería. Ninguna de las lecturas es correcta o incorrecta. Por ejemplo, una celda puede llegar a tener lecturas de resistencia más altas con el método de carga DC que con una señal de 1000 Hz AC. Esto indica simplemente que la batería funciona mejor con una carga AC que con una DC.

1. Método de carga DC: La medición óhmica pura es uno de los métodos de prueba más viejos y más fiables (figura 17). El instrumento aplica una carga que dura unos pocos

segundos. La corriente de carga va desde 25 a 70 amperios, dependiendo del tamaño de la batería. La caída de tensión dividida por la corriente da el valor de resistencia (Ley de Ohm). Las lecturas son muy exactas y repetitivas. Los fabricantes dicen que las lecturas de resistencia se encuentran en el rango de los 10mW. Durante la prueba, la unidad se calienta y será necesario un enfriamiento entre mediciones. La carga DC mezcla a R1 y R2 del modelo Randles en una única resistencia combinada e ignora el condensador. C es un componente muy importante de la batería y representa 1.5 faradios por cada 100 Ah de capacidad de celda.

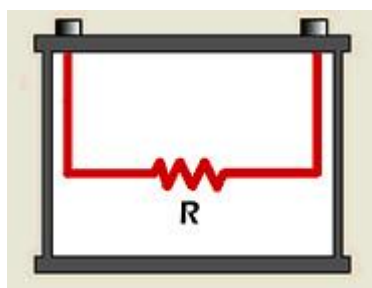


Figura 17. Método de carga DC.

2. Método de conductancia AC: En lugar de una carga DC, el instrumento inyecta en la batería una señal AC. Se elige una frecuencia entre 80 y 100 Hz para minimizar la reactancia. En esta frecuencia, la reactancia inductiva y capacitiva convergen, resultando en un retraso mínimo de tensión (compensándose sus efectos). Los fabricantes de equipos de conductancia AC dicen que las lecturas de resistencia de batería están en el rango de los 50mΩ. La tecnología de frecuencia única ve a los componentes del modelo Randles como una impedancia compleja llamada el módulo Z. La mayoría de la contribución proviene de la conductancia de la primera resistencia.

En la figura 18 se representa este método de determinación de la resistencia interna.

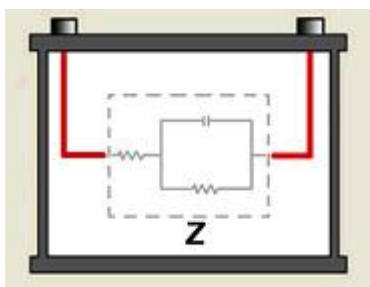


Figura 18. Método de conductancia AC.

3. Espectroscopia de impedancia electroquímica de frecuencia múltiple (EIS): El instrumento inyecta 24 frecuencias de excitación que van de 20 a 2000 Hz. Las señales sinusoidales se regulan a 10 mV/celda para permanecer dentro de la tensión térmica de la batería. Esto permite lecturas constantes para baterías pequeñas y grandes. Con la espectroscopia de impedancia de frecuencias múltiples, se pueden establecer los tres valores de resistencia del modelo de Randles.

En la figura 19 encontramos el esquema representativo de esta forma de medida.

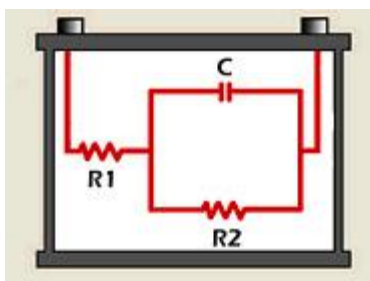


Figura 19. Método de Espectroscopia.

En las baterías, una parte de las pérdidas al cargarlas o descargarlas son debidas a su resistencia interna. Esta energía se convierte en calor, lo que explica por qué las baterías se calientan cuando están siendo cargadas.

Las tasas de recarga más lentas son más eficientes. Una batería clasificada en 180Ah (amperios-hora) en un período de 6 horas puede ser también clasificada como de 220Ah en un período de 20 horas, y de 260Ah en 48 horas. Gran parte de esta pérdida de eficiencia es debido a la mayor resistencia interna a mayores rangos de amperajes (la resistencia interna no es una constante).

En algunas aplicaciones se requiere saber el valor real de la resistencia interna de la celda. Este no es un valor general ya que varía con:

1. El estado de carga.
2. La densidad
3. Capacidad de la celda.
4. Temperatura de régimen.
5. El desgaste que ha tenido en su vida útil
6. Construcción física de la celda.

2.5.2. ESTUDIO SOBRE LA EFICIENCIA DE LA BATERÍA

Si se realiza un modelado eléctrico sencillo de una batería deberá tenerse en cuenta la existencia de un elemento resistivo. Si se analiza con más profundidad, su comportamiento se representará más fielmente por una asociación serie paralelo de resistencias y condensadores como se especificaba en los métodos de medida de la resistencia interna de una batería mencionados en el apartado 2.6.1 de este proyecto.

Históricamente se viene modelando la batería únicamente como una resistencia R , por lo que la potencia que disipa ésta batería y que afecta a la eficiencia del elemento, se cuantifica utilizando la ecuación siguiente:

$$P_{dis} = R * I^2 \quad (2.10)$$

donde:

P_{dis} es la potencia disipada en la resistencia.

R es la resistencia equivalente a la batería.

I es la corriente que circula por la batería.

De ella se deduce que la pérdida de potencia es directamente proporcional tanto al valor de la resistencia R como al cuadrado de la corriente que circula por dicha batería.

Esta corriente dependerá de la carga que conectemos a la batería.

El valor de la resistencia R es el valor de la resistencia interna que se considera que posee la batería y que se obtiene por medio de la hoja de características del elemento y, por lo tanto, es un valor proporcionado por el fabricante. Este fabricante lo consigue gracias a los resultados de una serie de ensayos que realiza a sus baterías. Los valores de esta resistencia interna son del orden de los miliohmios en la mayoría de los casos.

Para realizar un estudio teórico sobre la pérdida de potencia en una batería y, de este modo, conocer la cantidad de energía útil que se puede obtener a partir de la energía disponible en la batería, se va a analizar una batería de polímero de litio de la marca Enerland, modelo PQ5000XP.

En la hoja de características de esta batería, la resistencia interna adquiriría un valor de $4\text{ m}\Omega$ por lo que, aplicando la ecuación 2.10 y dando valores a la corriente en un rango entre los 0 A hasta los 9 A , se obtiene la figura 20 en el cual se representa la potencia disipada en la batería:

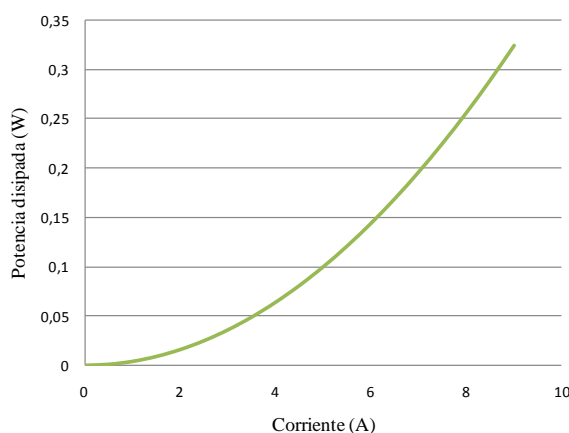


Figura 20. Potencia teórica disipada en la batería según la Ley de Ohm.

Con un ejemplo numérico sencillo se pueden ver las altas eficiencias que se consiguen con este modelo de batería.

Se parte de la suposición de que la carga conectada a la batería requiere un consumo de corriente de 5 A . La batería ofrece una tensión de $3,8\text{ V}$ por lo que la potencia generada por la batería será:

$$P_{gen} = V * I = 3,8 V * 5 A = 19 W \quad (2.11)$$

Según los resultados de la figura 20 se tiene que, para una corriente de 5 A, la potencia disipada en la batería es de 0,1 W aproximadamente.

Si se sustituyen los valores anteriores en la ecuación 2.7, se tiene lo siguiente:

$$\eta(\%) = \frac{(19-0,1)}{19} * 100 = 99,47 \quad (2.12)$$

Este valor del 99,47% es el rendimiento teórico de la batería analizada.

Aplicando las ecuaciones anteriores se puede construir una tabla de valores en la que se recojan los resultados de las potencias generadas y disipadas en la batería para las corrientes del rango señalado anteriormente, y el rendimiento que se obtiene para cada uno de estos valores.

Como se puede ver en la última columna de esta tabla 5, el rendimiento se sitúa, de media, en un 99,5 %:

I (A)	P _{dis} (W)	P _{gen} (W)	η (%)
0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	0,001	1,9	99,95
1	0,004	3,8	99,89
1,5	0,009	5,7	99,84
2	0,016	7,6	99,79
2,5	0,025	9,5	99,74
3	0,036	11,4	99,68
3,5	0,049	13,3	99,63
4	0,064	15,2	99,58
4,5	0,081	17,1	99,53
5	0,1	19	99,47
5,5	0,121	20,9	99,42
6	0,144	22,8	99,37

I (A)	P_{dis} (W)	P_{gen} (W)	η (%)
6,5	0,169	24,7	99,32
7	0,196	26,6	99,26
7,5	0,225	28,5	99,21
8	0,256	30,4	99,16
8,5	0,289	32,3	99,11
9	0,324	34,2	99,05

Tabla 5. Valores teóricos de eficiencia de una batería Lipo según Ley de Ohm.

Para poder contrastar los resultados de eficiencia que se obtienen aplicando la ley de Ohm y analizando la batería de manera teórica sería interesante poderlos comparar con los resultados de eficiencia práctica.

Estos resultados experimentales existen ya que Yuisbel Daniela Rojas [8], en su proyecto fin de carrera, ensayó tres celdas de la misma batería que se analiza teóricamente.

En este proyecto, por lo tanto, se intentará corroborar los magníficos valores de eficiencia comparando los valores teóricos con los prácticos.

En que consistieron estas pruebas realizadas y los resultados concretos que se obtuvieron se muestran en el Anexo II incluido al final de este proyecto.

Como primera idea cabe destacar que no sólo influye la resistencia interna en la eficiencia de la batería, sino que parámetros como la temperatura, la intensidad o la potencia requerida influyen en ella.

La influencia de la resistencia interna en la eficiencia es clara ya que, a medida que su valor aumenta, la eficiencia de la batería disminuye. Esto es debido a una disipación de potencia que se produce en la resistencia, pero hay que tener en cuenta los efectos sobre este suceso de la corriente requerida por la carga conectada a la batería y los efectos de la temperatura ya que no actúan de forma aislada.

La relación entre la corriente que circula por la batería y la temperatura a la que se encuentra el elemento es fuerte. Por ello, si se mantiene el voltaje ofrecido por la batería a nivel constante (3,7 V

aproximadamente) y se va aumentando poco a poco los requerimientos de corriente, la resistencia interna aumentará de valor y la eficiencia experimentará una caída en consecuencia.

La explicación de este hecho es sencillo: durante este proceso de circulación de corriente de valor cada vez mayor, la resistencia interna se va calentando, producto del paso de estas corrientes muy altas, y debe hacer grandes esfuerzos para dejarla circular, esto provoca que la misma aumente su valor debido al consumo y a las altas temperaturas, lo que ocasiona que la eficiencia de la celda disminuya progresivamente.

Varias ideas claras que se pueden deducir del ensayo práctico de una celda y que son de interés para el tema de la eficiencia son que:

- 1º. Se confirma que los valores dados por los fabricantes referentes a la eficiencia son ciertos, es decir, la batería tiene una eficiencia comprendida entre el 98%-99%, pero esto ocurre solo cuando la celda está manejando valores de intensidad muy pequeños. Si por la batería circula una intensidad elevada, los rangos de eficiencia se sitúan entre 50% y el 60%, valores pobres.
- 2º. El valor de la resistencia interna de una celda que dan los fabricantes en su catálogo no es cierto. Lo sitúan en valores rondando los $m\Omega$ cuando en realidad se acercan más a los centenares de $m\Omega$.

La relación entre la eficiencia y la potencia generada y disipada en la batería también es importante. En una batería, si el funcionamiento se produce con una corriente y tensión de valores dentro del rango nominal, no se producirá calentamiento de la misma ya que no se disipará energía en la resistencia interna. De esta forma, toda la energía producida se convertirá en útil y la eficiencia de la batería se situará en valores cercanos al 100%.

Si las corrientes y las tensiones se elevan por encima de sus valores nominales se iniciará un proceso de disipación de potencia donde la resistencia interna se irá calentando. Esto hará que la cantidad de energía producida en la batería no coincida con los valores de la energía que le llega a la carga y, debido a esto, la eficiencia disminuya.

2.5.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES SOBRE LA EFICIENCIA

Las pruebas realizadas en el proyecto fin de carrera de Yuisbel Rojas, ofrecían una serie de datos sobre la influencia de parámetros como la resistencia interna, la corriente, la potencia disipada, etc., sobre la eficiencia de las baterías que se pueden resumir con estas ideas concretas:

- El estudio de la eficiencia energética de las baterías a partir de la Ley de Ohm es erróneo. Los valores de eficiencia correctos serán los obtenidos a través del estudio de la batería bajo la influencia de factores como la temperatura, la potencia demandada, la corriente circulante, etc. además de por su valor de resistencia interna.
- Cuando la corriente demandada por la carga conectada a la batería es baja, la resistencia interna de la batería se mantiene en valores estables y no disipa potencia. En esta situación, la eficiencia se sitúa en los valores proporcionados por el fabricante (cercaos al 100%).

Si esta corriente aumenta, la resistencia interna de la batería también lo hará, disipando parte de la energía proporcionada en forma de calor (por efecto de la temperatura). Esta disipación hace que disminuya la eficiencia debido a que la diferencia entre la energía suministrada y obtenida se hace mayor.

- El valor de la resistencia interna ofrecida por los fabricantes dista mucho de ser la correcta. Depende de las condiciones de funcionamiento de la batería.

Como se puede comprobar de la comparación de la tabla de características de la batería ensayada, recogida en el Anexo I, y los resultados de los ensayos de la misma, cuyos resultados se pueden ver en el Anexo II, el valor de resistencia interna ofrecido por el fabricante se aleja de la realidad.

En el gráfico representado en la figura 21 se puede ver esta diferencia, teniendo en cuenta que la resistencia interna de la batería que figura en la hoja de características es de $4\text{ m}\Omega$. Los valores reales oscilan entre los $0,1$ y los $0,4\ \Omega$, según la corriente que circule por el circuito.

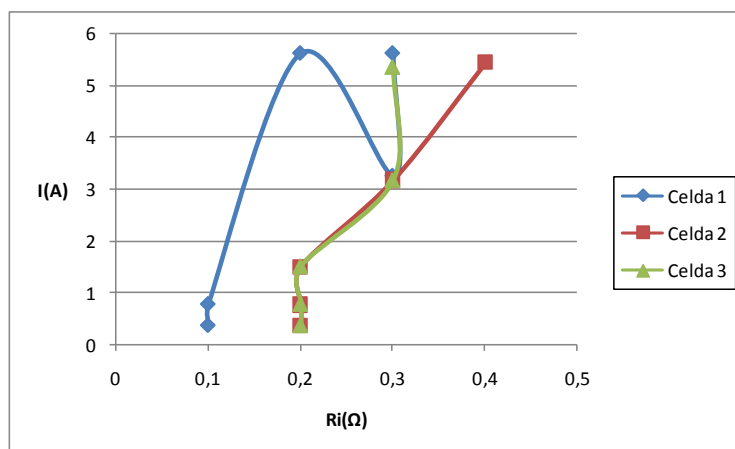


Figura 21. Valores de la resistencia interna de la batería ensayada.

- La relación existente entre la temperatura, la corriente demandada y la eficiencia se puede ver en los seis gráficos representados a continuación.

En los tres primeros (figuras 22, 23 y 24), se representan los resultados obtenidos al ensayar las tres celdas anteriormente mencionadas.

Se registran los valores de eficiencia cuando pasa por el circuito un determinado valor de corriente comprendido entre 1 A y 8 A y las celdas son sometidas a tres temperaturas distintas que son 30, 32 y 35°C.

El mayor valor de eficiencia lo obtenemos cuando la corriente demandada por la carga se encuentra dentro del rango fijado por la tensión nominal. Este valor de eficiencia se sitúa en valores cercanos al 95%.

Cuando la batería sufre los efectos de la temperatura debido a un consumo alto de corriente y, por lo tanto, a una disipación de potencia alta, los valores de eficiencia disminuyen en un máximo del 30% situándose en valores cercanos al 65%.

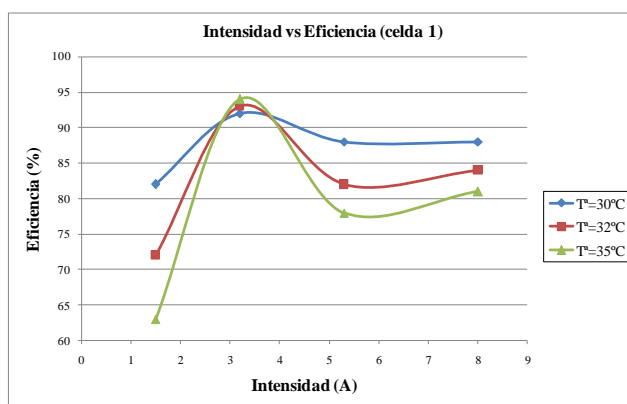


Figura 22. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 1.

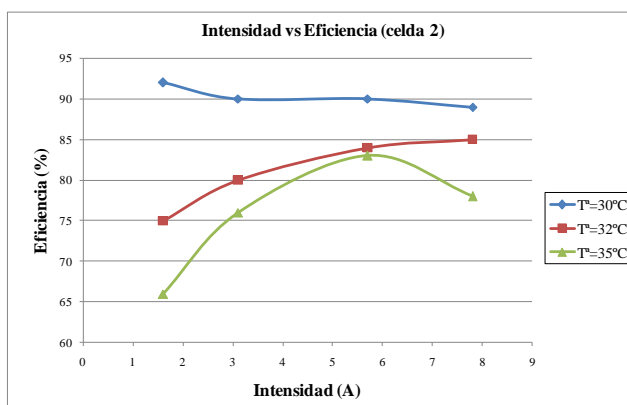


Figura 23. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 2.

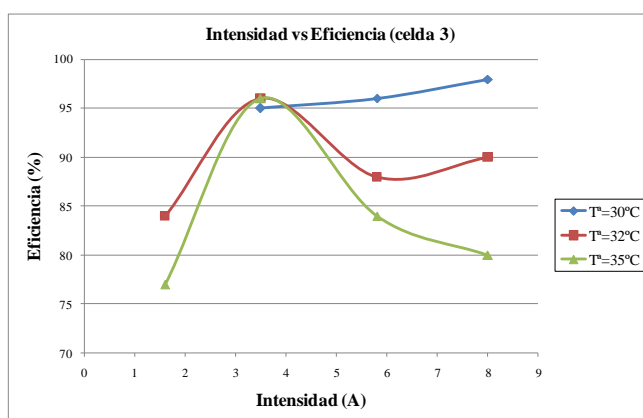


Figura 24. Relación entre intensidad y eficiencia para la celda 3.

En los tres últimos gráficos, figuras 25, 26 y 27, representados a continuación, se puede ver la misma idea que en los anteriores pero desde otro punto de vista.

Para una misma temperatura, si la resistencia de carga conectada en cada celda es mayor (recordando, con ayuda de la consulta del Anexo II, que $R1=2.3\Omega$, $R2=0.9\Omega$, $R3=0.4\Omega$ y $R4=0.1\Omega$), la corriente que circula por el circuito será menor y la eficiencia de la celda se acercará más al valor óptimo.

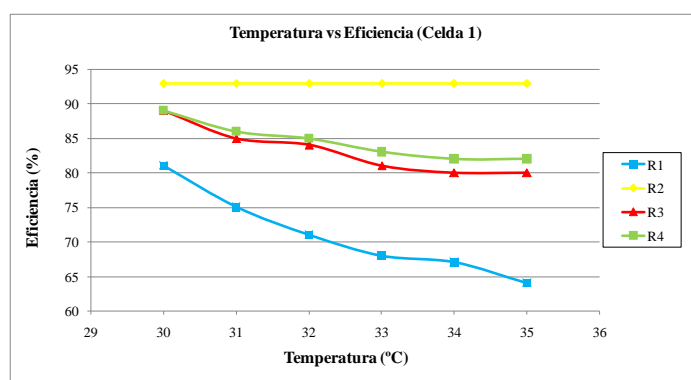


Figura 25. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 1.

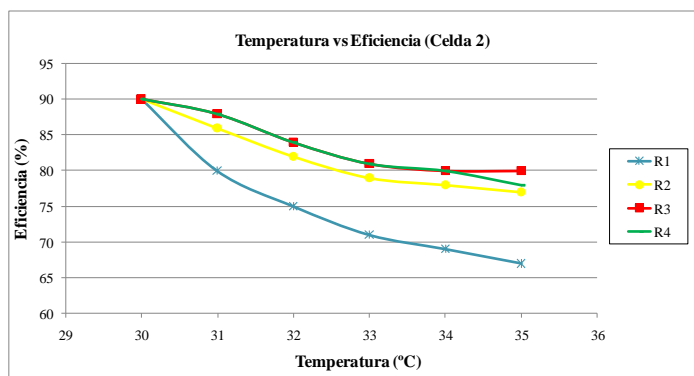


Figura 26. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 2.

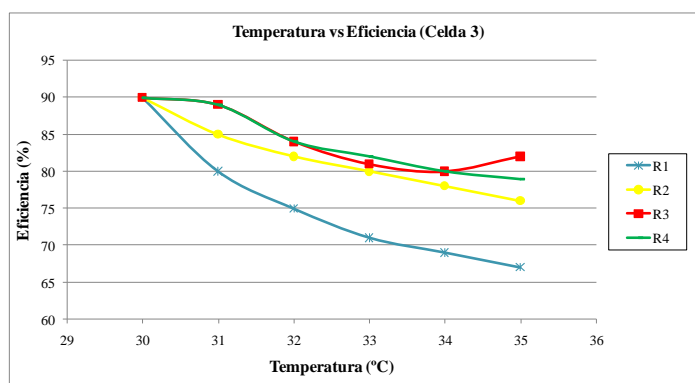


Figura 27. Variación de la eficiencia con la temperatura de la celda 3.

De los resultados experimentales de la celda se puede deducir que la eficiencia de una batería no se puede cuantificar utilizando la Ley de Ohm expresada en la ecuación 2.10.

En esta ecuación sólo se tiene en cuenta el efecto de la resistencia interna en la eficiencia basándose en el hecho de que disipa potencia porque es una carga resistiva en su modelo eléctrico.

Para cuantificar la eficiencia de una batería de manera ajustada a la realidad, hay que introducir un factor que añada la influencia de parámetros como la corriente, la potencia y la temperatura de la batería durante su funcionamiento.

3. PARTE II: CONTROLADOR

La energía que procede de la batería instalada en el sistema se inyecta en el motor utilizado. En función de las características que se quiera obtener de este motor, se deberá actuar sobre ciertos parámetros, de ahí la necesidad de utilizar controladores.

Los motores que se van a analizar en este proyecto son los motores de corriente continua y los motores de corriente alterna.

En este apartado se intentará buscar aquel sistema de control que proporcione mayor eficiencia para cada tipo de motor antes mencionado.

3.1. FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES

Un controlador es un dispositivo capaz de controlar ciertos parámetros de los motores para permitir un funcionamiento ajustado a las necesidades precisas en cada momento.

Las necesidades que debe satisfacer vienen impuestas por el sistema mecánico que controlan, además de por los objetivos que debe cumplir el accionamiento del que forman parte.

Un accionamiento lo forman la fuente de alimentación, un convertidor electrónico de potencia, el propio sistema de regulación o control, el motor eléctrico, el sistema de transmisión y la carga mecánica.

Los objetivos de los accionamientos son fijar, variar o mantener la velocidad, arrancar o parar con suavidad, ajustar los parámetros del proceso, sincronizar velocidad y posición y controlar aceleraciones por lo que todas estas son necesidades que debe satisfacer el control.

Además, el sistema mecánico impone una serie de requerimientos a los que deberá hacer frente el control que son los tiempos cortos de arranque, paro e inversión, los tiempos cortos de cambios de velocidad, el control de las aceleraciones, el mantenimiento de la velocidad en un valor constante, la parada en posición y el proporcionar un par a baja velocidad.

3.2. CONTROL PARA MOTORES DE CONTINUA

Para realizar el control de los motores de corriente continua se van a analizar los motores de excitación serie y de excitación independiente planteando las ecuaciones que rigen su funcionamiento. Con ello se pretende fijar los parámetros sobre los que hay que actuar en cada tipo de motor para realizar el control.

En la figura 28 se representa un esquema de dicha regulación.



Figura 28. Esquema del sistema de regulación de la máquina de continua.

La alimentación proviene de la batería (cc), se inyecta en un chopper, también llamado convertidor para referirse a él de una forma más genérica, encargado de variar el nivel de alimentación continua que se introduce en el motor (cc').

En este apartado se van a estudiar ambos motores anteriormente citados por medio de sus esquemas eléctricos y las ecuaciones que rigen su funcionamiento para fijar sobre que parámetros se debe actuar para conseguir el control de las máquinas. Por último se explicarán brevemente tanto los circuitos electrónicos utilizados en el chopper como los sistemas de regulación que se pueden aplicar.

El fin de este análisis es conocer esta parte del bloque estudiado en este proyecto y así poder fijar la eficiencia resultante.

A continuación se pasa a definir la notación utilizada en la formulación expuesta en este punto para facilitar su comprensión. Las variables a utilizar, para ambos motores, son las siguientes [21]:

- Tensión de armadura de la máquina de corriente continua: V_a
- Corriente de armadura: I_a
- Resistencia de armadura: R_a

- Inductancia de armadura: L_a
- Tensión de campo (excitación): V_f
- Corriente de campo (excitación): I_f
- Resistencia de campo: R_f
- Inductancia de campo: L_f
- Tensión en el motor: E
- Variable que relaciona E con el flujo: M (ya que $E = M * \Phi$, siendo Φ el flujo magnético inducido)

3.2.1. MOTOR DE EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

3.2.1.1. Funcionamiento. Ecuación del par

En la máquina de excitación independiente, el inductor crea una corriente (I_f) que genera un flujo magnético que induce un par en el motor al interactuar con la corriente en el inducido (I_a).

Un esquema de dicho motor de continua es el recogido en la figura 29.

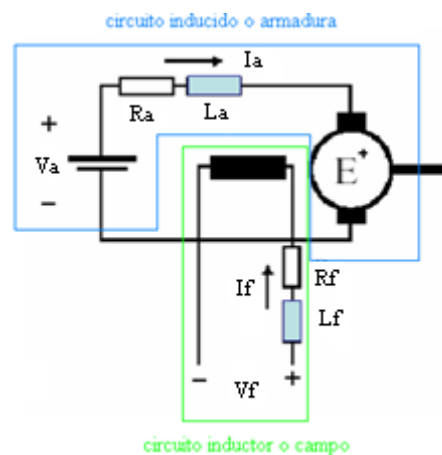


Figura 29. Esquema de un motor de excitación independiente.

Para poder obtener las variables sobre las que actuar para realizar el control, se estudian las ecuaciones que expresan el funcionamiento de este motor de continua. Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$V_a = R_a * I_a + E = R_a * I_a + M * I_f * \omega_m$$

$$V_f = R_f * I_f \rightarrow I_f = V_f * R_f$$

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a} = \frac{V_a}{R_a} - \frac{M * I_f * \omega_m}{R_a}$$

$$P_m = E * I_a = M * I_f * I_a * \omega_m$$

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = M * I_f * I_a$$

$$T_e = \frac{V_a * I_f * M}{R_a} - \frac{(I_f * M)^2}{R_a} * \omega_m = \frac{V_a * V_f * M}{R_a * R_f} - \frac{(V_f * M)^2}{R_a * R_f^2} * \omega_m \quad (3.1)$$

De la ecuación del par obtenida se puede ver que, para regular la velocidad del motor se deberá actuar bien sobre la tensión del inducido (V_a), bien sobre la corriente del inductor (I_f).

3.2.1.2. Curva par-velocidad

Las curvas de par-velocidad de un motor de corriente continua describen la capacidad de producción de un par estático del motor respecto al voltaje aplicado y a la velocidad del motor.

De las ecuaciones obtenidas en el apartado anterior se puede deducir la forma de esta curva, que será la reflejada en la figura 30.

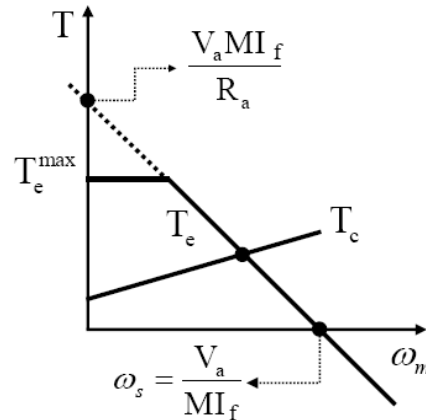


Figura 30. Curva par-velocidad de un motor de continua de excitación independiente. [21]

Las formas de controlar un motor de este tipo son dos:

- En la región 1 (que cubre el rango de velocidad cero a velocidad nominal) la regulación se hace por control de la tensión aplicada al inducido (armadura) \rightarrow control de i_a .
- En la región 2 (desde la velocidad nominal) la regulación se hace por control de la corriente de excitación o campo (inductor) \rightarrow control de i_f .

La figura 31 muestra, esquemáticamente, las dos formas de control del motor. En la región 1, se controla el motor a par constante, por lo que la corriente de excitación (i_f) se mantiene en un valor constante mientras que la tensión de inducido (V_a), y por lo tanto la corriente de inducido (i_a) ya que son directamente proporcionales, varía. Al ir aumentando el valor de la potencia también lo hará el valor de la velocidad de giro en el eje ($\omega_m \leq \omega_n$, siendo ω_n a velocidad nominal de la máquina)

En la región 2, se controla el motor a potencia constante por lo que la tensión de inducido (V_a) mantendrá su valor constante mientras que la corriente de excitación variará (i_f). Al mantenerse la potencia constante, la velocidad irá aumentando ya que el par tomará valores cada vez menores.

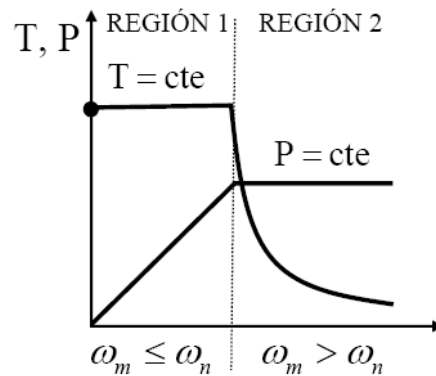


Figura 31. Regiones de control de un motor de continua con excitación independiente. [21]

Si en la regulación de velocidad del motor actuamos sobre la tensión de inducido, se formarían familias de curvas par-velocidad con igual pendiente que la representada en la figura 30 y a mayor tensión de inducido mayor será el par (T) obtenido a velocidad de giro nula.

Si la regulación de velocidad la obtenemos al actuar sobre la corriente de excitación, se formarían familias de curvas con distintas pendientes a la de la figura 30.

3.2.2. MOTOR DE EXCITACIÓN SERIE

3.2.2.1. Funcionamiento. Ecuación del par

El motor de corriente continua con excitación serie se representa esquemáticamente en la figura 32.

Se produce una alimentación única del circuito desde V_f , por lo que la corriente que circula por todos los elementos del circuito es la misma (es decir, $i_f = i_a$).

Esa corriente hace que se genere un flujo magnético en la bobina (L_c) que induce un par en el motor al interaccionar con la corriente ($i_f = i_a$).

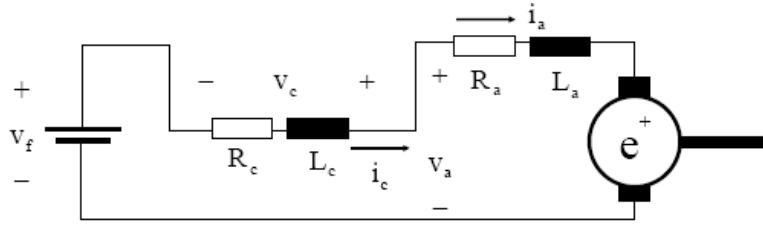


Figura 32. Esquema eléctrico de un motor de continua con excitación serie.

Las ecuaciones matemáticas que describen el funcionamiento son las detalladas a continuación y de las cuáles se va a obtener la ecuación del par de la máquina en función del resto de parámetros del circuito [21]:

$$V_f = (R_a + R_f) * I_a + (E * V_f) = R_a + R_f + (M * w_m) * I_a$$

$$I_a = \frac{V}{R_a + R_f + (M * w_m)} \quad (3.2)$$

$$P_m = E * I_a = M * I_a^2 * w_m \quad (3.3)$$

$$T_e = \frac{P_m}{w_m} = M * I_a^2 = \frac{M * V_f^2}{[R_a + R_f + (M * w_m)]} \quad (3.4)$$

Con la ecuación del par (T_e) se puede ver que actuando sobre V_f se hace posible la regulación de velocidad de esta máquina.

3.2.2.2. Curva par-velocidad

La curva par-velocidad de este tipo de motores se refleja en la figura 33, la cual se ha obtenido a partir de la ecuación deducida en el apartado anterior y que relacionaba el par del motor (T_e) con la velocidad en el eje (w_m).

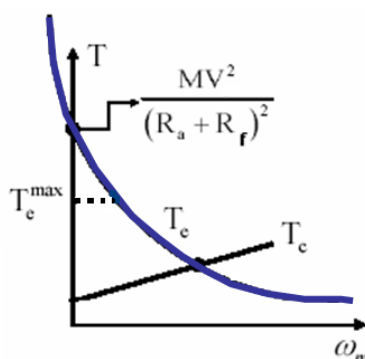


Figura 33. Curva par-velocidad de un motor de corriente continua con excitación serie. [21]

La forma de controlar este tipo de motores es más sencilla que en el caso de motor con excitación independiente ya que sólo se puede actuar sobre la tensión inyectada en el circuito.

3.2.3. MÉTODO DE CONTROL. MODULACIÓN PWM

La velocidad de un motor cc es directamente proporcional a la tensión suministrada así que si esta se ve reducida, la velocidad lo hará en la misma proporción.

El controlador de velocidad trabaja variando el valor de tensión medio que es enviado al motor. Esto se podría hacer ajustando el valor de tensión que se manda al motor en cada momento pero resultaría un método altamente ineficaz. Un mejor camino sería instalar un dispositivo electrónico que actuase como interruptor entre la fuente de alimentación y el motor para que controlara que durante un periodo de tiempo le llegue un nivel de tensión (interruptor cerrado) o no le llegue alimentación (interruptor abierto) para poder variar de esa forma la tensión media que le llega de una forma tan rápida que no se vea afectado el resto de parámetros.

En la figura 34 se encuentra representada la variación de velocidad del motor en función del voltaje suministrado.

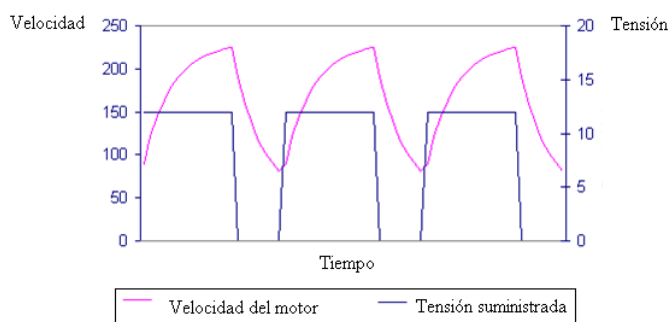


Figura 34. Velocidad-tensión suministrada de un motor de continua con control PWM. [22]

Un ejemplo de la forma de operar de un controlador PWM viene representado en la figura 35. Se representan los anchos de pulsos que envía al motor para conseguir los distintos niveles de tensión y, por lo tanto, las velocidades de dicho motor. En la gráfica A se observa la velocidad máxima que se controla con, aproximadamente, el 90% del tiempo encendido, en la gráfica B el 50% y en la parte C la velocidad mínima o el 10% del tiempo encendido.

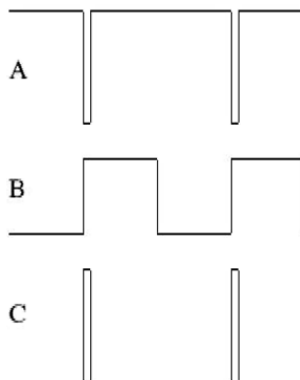


Figura 35. Variación en los anchos de pulso del control PWM para obtener mayor o menor velocidad. [22]

La modulación PWM se puede llevar a cabo con varios dispositivos electrónicos. En el apartado siguiente de este proyecto se estudiarán los choppers, que es un interruptor electrónico que se usa para interrumpir una señal bajo el control de otras dos. Se considera la conmutación de los choppers por medio de tres dispositivos: los GTO, los IGBT's y los MOSFET.

Se podría aplicar control vectorial para variar la velocidad del motor de continua pero, aunque su control es sencillo, el mantenimiento es caro.

3.2.4. CIRCUITO DE CONMUTACIÓN. CHOPPER

3.2.4.1. Detalle del funcionamiento

En este apartado se pasa a detallar el funcionamiento de los choppers que se utilizan tanto para el control de los motores de continua de excitación independiente como los motores de excitación serie.

El chopper es un circuito encargado de la regulación de una fuente de corriente continua que posee un valor fijo o pobremente regulado (en nuestro caso será un valor fijo proveniente de la batería).

Existen diversos tipos de choppers que difieren entre sí según sea el número de cuadrante del diagrama tensión-corriente en los que son capaces de trabajar. El chopper directo o reductor trabaja en el cuadrante I, el chopper inverso o elevador, en el cuadrante II, el chopper de dos cuadrantes trabaja en los cuadrantes I y II y el de cuatro cuadrantes, en todos.

En la figura 36 viene representado el diagrama tensión-corriente que manejan estos circuitos.

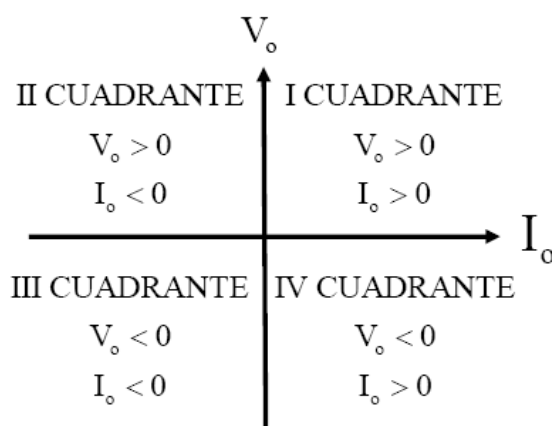


Figura 36. Cuadrantes de funcionamiento de los choppers. [23]

Sus características básicas son que permiten variar y controlar el valor medio de la tensión que le llega a una carga a partir de una tensión de valor fijo, se construye con interruptores estáticos

(GTO's, IGBT's, transistores, etc.) y diodos de potencia y es un equipo que puede manejar altas potencias con gran rendimiento.

Sus ventajas son la regulación continua, con menores pérdidas y con posibilidad de regeneración de la tensión y un mantenimiento sencillo. Como desventajas se pueden señalar la necesidad de filtros de continua, los cuales implican un alto coste y la necesidad de personal suficientemente cualificado para el mantenimiento y control.

3.2.4.2. Clasificación de los choppers

A continuación se detallan los tipos de circuitos chopper que se pueden montar en función del signo de la corriente y tensión que proporcionan.

En las figuras representadas en todo este apartado del proyecto se elige el uso del dispositivo GTO para realizar la conmutación pero hay que señalar que se puede utilizar cualquiera de los mencionados, es decir, IGBT's o MOSFET's

3.2.4.2.1. *Chopper directo*

En la figura 37 se encuentra representado el esquema eléctrico del circuito de un chopper directo:

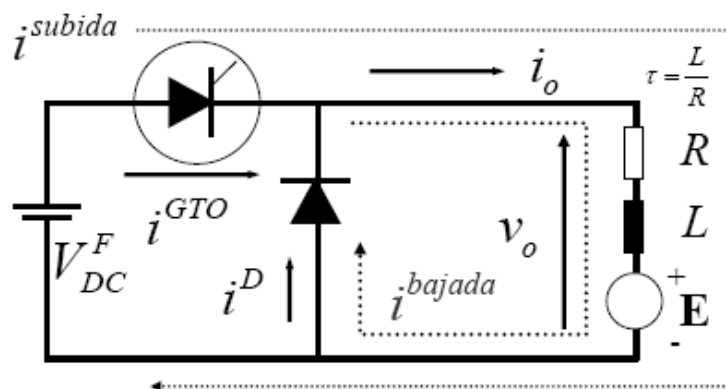


Figura 37. Esquema eléctrico de un chopper directo [23]

➤ Obtención de la reducción de tensión:

En la figura 38 se representa la tensión y la corriente que circulan por la carga

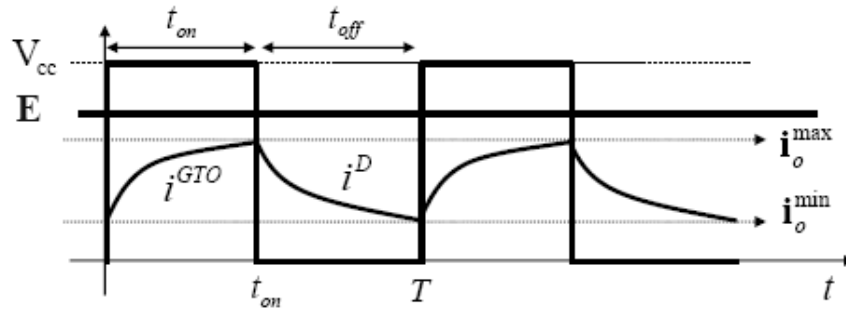


Figura 38. Curvas de tensión y corriente en la carga (chopper directo). [23]

Las ecuaciones que representan el funcionamiento son:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_{dc}^F dt = \frac{t_{on}}{T} V_{dc}^F = \delta * V_{dc}^F \rightarrow$$

$$\frac{t_{on}}{T} = \delta \text{ siendo } \delta \text{ la razón de conducción } (0 \leq \delta \leq 1)$$

$$(V_o^{min} = 0) \leq V_o \leq (V_o^{max}) = V_{dc}^F \quad (3.5)$$

Formas de control \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} t_{ON} \text{ variable y } T \text{ fijo} \rightarrow \text{modulación por ancho de pulso.} \\ t_{ON} \text{ fijo y } T \text{ variable} \rightarrow \text{modulación en frecuencia.} \\ t_{ON} \text{ y } T \text{ variables} \rightarrow \text{modulación en frecuencia y pulso.} \end{array} \right.$

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{ON}} V_{cc} dt = \frac{t_{ON}}{T} V_{cc} = \delta V_{cc} \quad (3.6)$$

$$V_{DC} = \delta * V_{cc} \geq 0$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC} - E}{R} = \frac{\delta V_{cc} - E}{R} \geq 0 \rightarrow \delta \geq \frac{E}{V_{cc}} \quad (3.7)$$

$t_{on} \rightarrow$ tiempo en el que conduce el GTO

$t_{off} \rightarrow$ tiempo en el que conduce el DIODO

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \rightarrow \text{razón de conducción}$$

Controlando el tiempo de conducción del GTO obtenemos la razón de conducción necesaria para que el valor de la tensión sobre la carga sea el requerido.

3.2.4.2.2. Chopper inverso

Esquema eléctrico del circuito de chopper inverso se representa en la figura 39:

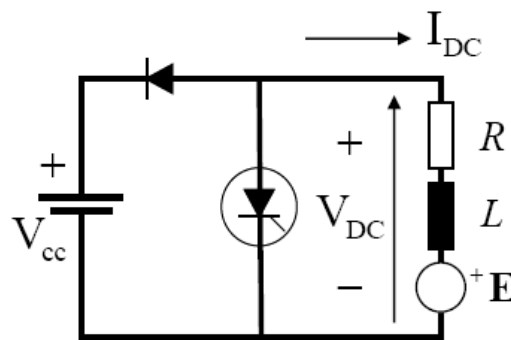


Figura 39. Esquema eléctrico de un chopper inverso. [23]

➤ Obtención de la elevación de tensión:

La figura 40 representa la tensión y la corriente que circulan por la carga

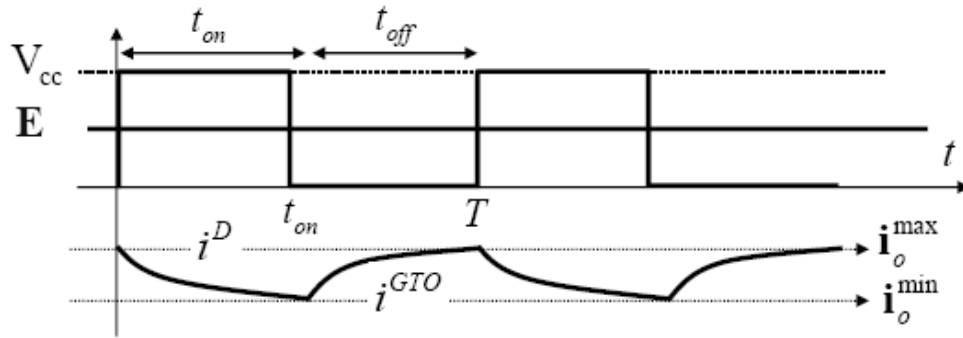


Figura 40. Curvas de tensión y corriente en la carga (chopper inverso). [23]

Las ecuaciones que representan el funcionamiento son:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^T V_{cc} dt = \frac{T-t_{on}}{T} V_{cc} = (1 - \delta) V_{cc} \quad (3.8)$$

$$V_{DC} = (1 - \delta) * V_{cc} \geq 0$$

$$I_{DC} = \frac{V_{DC} - E}{R} = \frac{(1 - \delta) V_{cc} - E}{R} \leq 0 \rightarrow \delta \geq 1 - \frac{E}{V_{cc}} \quad (3.9)$$

$t_{on} \rightarrow$ tiempo en el que conduce el GTO

$t_{off} \rightarrow$ tiempo en el que conduce el DIODO

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \rightarrow \text{razón de conducción}$$

3.2.4.2.3. Chopper de dos cuadrantes

Actúa en los cuadrantes I y II por lo que puede elevar o reducir la tensión que le llega a la carga simplemente con la actuación de un par GTO-diodo u otro.

El esquema eléctrico de este tipo de circuito es el mostrado en la figura 41.

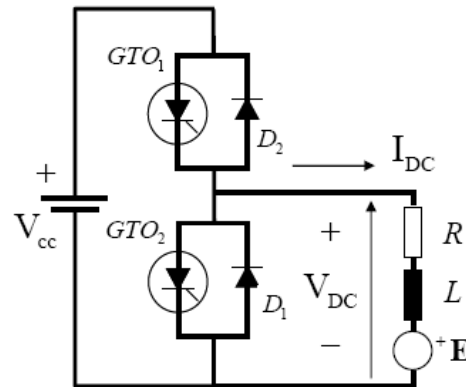


Figura 41. Esquema eléctrico de un chopper de dos cuadrantes. [23]

3.2.4.2.4. Chopper de cuatro cuadrantes

Actúa en todos los cuadrantes del diagrama V-I por lo que se pueden obtener corrientes y tensiones de cualquier signo.

Esquema eléctrico del circuito de chopper de cuatro cuadrantes se representa en la figura 42:

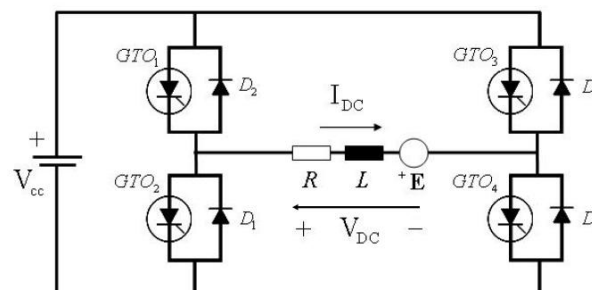


Figura 42. Esquema eléctrico de un chopper de dos cuadrantes. [23]

Las ecuaciones son las mismas que en casos anteriores.

Aclaración

Debido a la capacidad del circuito para tomar valores de corriente y tensión de ambos signos, se puede ver que la máquina eléctrica acoplada en su eje podrá actuar como motor o como generador en función del signo de la potencia.



Si la potencia en el eje es negativa, actuará como generador. Esto se da cuando tensión y corrientes poseen valores de signos distintos, lo que se produce en los cuadrantes II y IV. Este caso no nos interesa.

Si la potencia en el eje es positiva, actuará como motor. Esto se consigue cuando tanto la tensión como la corriente tienen igual signo, hecho que se da en los cuadrantes I y III. Este es el caso que ocupa este proyecto.

Se requerirá un control para un funcionamiento de la máquina como motor, por lo que con colocar un chopper directo será suficiente.

3.2.4.3. Dispositivos de conmutación

Como ya se señalaba en apartados anteriores, para construir un chopper que se encargue de controlar la alimentación proveniente de la batería que le llega al motor de continua se pueden utilizar múltiples dispositivos electrónicos de conmutación.

En este proyecto se han elegido tres: el tiristor GTO y los transistores MOSFET e IGBT.

A continuación se va a profundizar en las características de cada uno, así como en sus ventajas e inconvenientes.

3.2.4.3.1. *Basados en tiristores GTO*

En los primeros párrafos de este apartado se describe teóricamente los tiristores a nivel general para continuar, en los últimos párrafos, con los GTO de los que pueden estar compuestos los choppers.

Un tiristor es un dispositivo semiconductor de tres terminales: ánodo cátodo y compuerta. La figura 18 muestra el símbolo del tiristor y una sección recta de tres uniones pn.

Cuando el voltaje del ánodo se hace positivo con respecto al cátodo, las uniones J_1 y J_3 tienen polarización directa o positiva. La unión J_2 tiene polarización inversa, y solo fluirá una pequeña corriente de fuga del ánodo al cátodo. Se dice entonces que el tiristor está en condición de bloqueo directo o en estado desactivado llamándose a la corriente fuga corriente de estado inactivo I_D . Si el voltaje ánodo a cátodo V_{AK} se incrementa a un valor lo suficientemente grande la unión J_2 polarizada inversamente entrará en ruptura. Esto se conoce como ruptura por avalancha y el voltaje

correspondiente se llama voltaje de ruptura directa V_{BO} . Dado que las uniones J_1 y J_3 ya tienen polarización directa, habrá un movimiento libre de portadores a través de las tres uniones que provocará una gran corriente directa del ánodo. Se dice entonces que el dispositivo está en estado de conducción o activado.

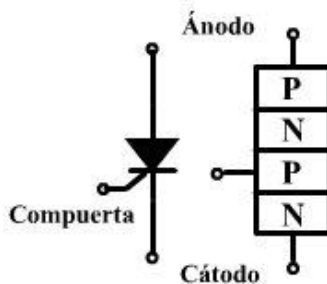


Figura 43. Símbolo del tiristor y tres uniones pn. [23]

La caída de voltaje se deberá a la caída óhmica de las cuatro capas y será pequeña, por lo común 1V. En el estado activo, la corriente del ánodo debe ser mayor que un valor conocido como corriente de enganche I_L , a fin de mantener la cantidad requerida de flujo de portadores a través de la unión; de lo contrario, al reducirse el voltaje del ánodo al cátodo, el dispositivo regresará a la condición de bloqueo. La corriente de enganche, I_L , es la corriente del ánodo mínima requerida para mantener el tiristor en estado de conducción inmediatamente después de que ha sido activado y se ha retirado la señal de la compuerta.

Una vez que el tiristor es activado, se comporta como un diodo en conducción y ya no hay control sobre el dispositivo. El tiristor seguirá conduciendo, porque en la unión J_2 no existe una capa de agotamiento de vida a movimientos libres de portadores. Sin embargo si se reduce la corriente directa del ánodo por debajo de un nivel conocido como corriente de mantenimiento I_H , se genera una región de agotamiento alrededor de la unión J_2 debido al número reducido de portadores; el tiristor estará entonces en estado de bloqueo. La corriente de mantenimiento es del orden de los miliamperios y es menor que la corriente de enganche, I_L . Esto significa que $I_L > I_H$. La corriente de mantenimiento I_H es la corriente del ánodo mínima para mantener el tiristor en estado de régimen permanente.

Cuando el voltaje del cátodo es positivo con respecto al del ánodo, la unión J_2 tiene polarización directa, pero las uniones J_1 y J_3 tienen polarización inversa. Esto es similar a dos diodos conectados en

serie con un voltaje inverso a través de ellos. El tiristor estará en estado de bloqueo inverso y una corriente de fuga inversa, conocida como corriente de fuga inversa I_R , fluirá a través del dispositivo.

Entre las mejoras más recientes que se le han hecho al tiristor está el apagado por compuerta (GTO - Gate Turn Off). Un tiristor GTO (figura 44) es un SCR (Silicon Controlled Rectifier) que puede apagarse por una pulsación suficientemente grande en su compuerta de entrada, aun si la corriente i_D excede I_H . Aunque los tiristores GTO se han venido usando desde 1960, solamente se volvieron prácticos para las aplicaciones de control de motores, al final de los años setenta. Estos dispositivos se han vuelto más y más comunes en las unidades de control de motores, puesto que ellos eliminaron la necesidad de componentes externos para apagar los SCR en circuitos de cc.

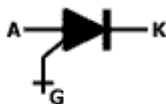


Figura 44. Símbolo del GTO. [23]

Un tiristor GTO requiere una mayor corriente de compuerta para encendido que un SCR común. Para grandes aparatos de alta potencia se necesitan corrientes de compuerta del orden de 10 A o más. Para apagarlos se necesita una gran pulsación de corriente negativa de entre 20 y 30 ms de duración. La magnitud de la pulsación de corriente negativa debe ser de un cuarto a un sexto de la corriente que pasa por el aparato.

Como el GTO tiene una conducción de corriente unidireccional, y puede ser apagado en cualquier instante, éste se aplica en circuitos chopper (conversiones de dc- dc) y circuitos inversores (conversiones dc -ac) a niveles de potencia en los que los MOSFET 's y los BJT's no pueden ser utilizados. A bajos niveles de potencia los semiconductores de conmutación rápida son preferibles.

Las principales ventajas e inconvenientes del GTO son los siguientes:

➤ Ventajas:

- Soportan elevadas sobreintensidades durante tiempos reducidos.
- Se puede apagar mediante un impulso de corriente negativo en su puerta.

- Sus pérdidas en conducción son reducidas.
 - Es capaz de manejar grandes tensiones y corrientes.
- Inconvenientes:
- Las pérdidas de conmutación son elevadas.

3.2.4.3.2. Basados en transistor MOSFET

Los transistores de efecto de campo, conocidos generalmente como FET (por las siglas en inglés Field-Effect Transistor, transistor de efecto campo), son un dispositivo unipolar, ya que la corriente existe tanto en forma de electrones como de huecos. En un FET de canal n, la corriente se debe a electrones, mientras que en un FET de canal p, se debe a huecos. Ambos tipos de FET se controlan por una tensión entre la compuerta y la fuente.

Los transistores de tipo MO son aquellos en los que se utiliza la estructura MOS (Metal Oxide Semiconductor) para su construcción. Esta estructura consiste en un condensador en la que una armadura (puerta) es metálica mientras que la otra es un semiconductor (sustrato), el dieléctrico que se encuentra entre las armaduras está hecho de un óxido del semiconductor del sustrato.

Se tiene MOSFET's de canal N o de canal P (figura 45) y en ambos, cuando no se aplica tensión en la compuerta, no hay flujo de corriente entre el drenaje (drain) y la fuente (source)

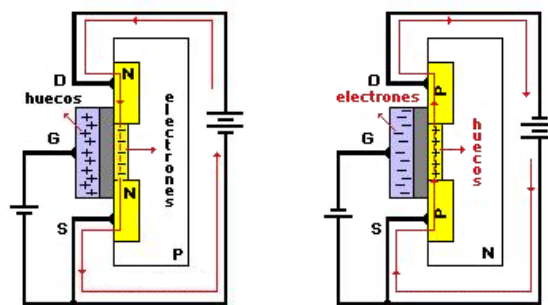


Figura 45. MOSFET's tipo N y tipo P. [23]

Para que circule corriente en un MOSFET de canal N se debe aplicar en la compuerta una tensión positiva. Así los electrones del canal N de la fuente (source) y el drenaje (drain) son atraídos a la compuerta (gate) y pasan por el canal p entre ellos.

El movimiento de estos electrones, crea las condiciones para que aparezca un puente para los electrones entre el drenaje y la fuente. La amplitud o anchura de este puente (y la cantidad de corriente) depende o es controlada por la tensión aplicada a la compuerta.

En el caso del MOSFET de canal p, se da una situación similar. Cuando se aplica una tensión negativa en la compuerta, los huecos (ausencia de electrones) del canal p del drenaje y de la fuente son atraídos hacia la compuerta y pasan a través del canal n que hay entre ellos, creando un puente entre drenaje y fuente. La amplitud o anchura del puente (y la cantidad de corriente) depende de la tensión aplicada a la compuerta.

Debido a la delgada capa de óxido que hay entre la compuerta y el semiconductor, no hay corriente por la compuerta. La corriente que circula entre drenaje y fuente es controlada por la tensión aplicada a la compuerta.

El transistor MOSFET (figura 46) es otro dispositivo electrónico cuyas ventajas e inconvenientes se detallan a continuación:

- Ventajas:
 - Son muy fáciles de controlar.
 - Las pérdidas de conmutación son muy reducidas.
 - Puede soportar altos valores de tensión e intensidad.
 - Soporta una elevada frecuencia de conmutación.
- Inconvenientes:
 - Las pérdidas de conducción son elevadas.

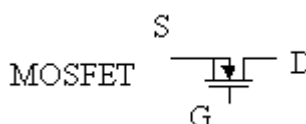


Figura 46. Esquema eléctrico de un MOSFET. [23]

3.2.4.3.3. Basados en transistor IGBT's

El transistor IGBT, de las siglas en inglés “Insulated Gate Bipolar Transistor”, es un dispositivo que aprovecha la facilidad de disparo de los MOSFET con las pequeñas pérdidas en conducción de los BJT de potencia. La puerta está aislada del dispositivo, con lo que se tiene un control por tensión relativamente sencillo. Entre el colector y el emisor se tiene un comportamiento tipo bipolar, con lo que el interruptor es muy cercano a lo ideal. La figura 47 muestra la simbología para este tipo de transistores.

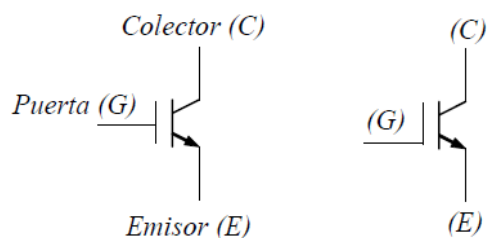


Figura 47. Símbolo del IGBT. [23]

La estructura del IGBT es similar a la del MOSFET, pero con la inclusión de una capa p+ que forma el colector del IGBT, como se puede ver en la figura 48.

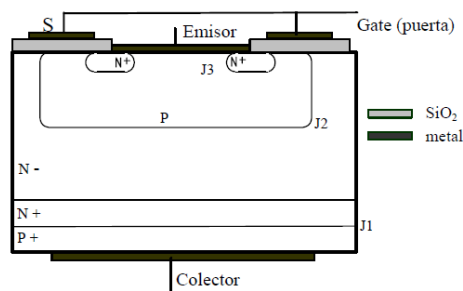


Figura 48. Estructura básica del transistor IGBT. [23]

Gracias a la estructura interna puede soportar tensiones elevadas, típicamente 1200 V y hasta 2000 V (algo impensable en los MOSFET's), con un control sencillo de tensión de puerta. La velocidad a la que

pueden trabajar no es tan elevada como la de los MOSFET's, pero permite trabajar en rangos de frecuencias medias, controlando potencias bastante elevadas.

En términos simplificados se puede analizar el IGBT como un MOSFET en el cual la región N- tiene su conductividad modulada por la inyección de portadores minoritarios (agujeros), a partir de la región P+, una vez que J1 está directamente polarizada. Esta mayor conductividad produce una menor caída de tensión en comparación a un MOSFET similar.

El control del componente es análogo al del MOSFET, es decir, por la aplicación de una polarización entre puerta y emisor. También para el IGBT el accionamiento o disparo se hace por tensión.

➤ Ventajas:

- Trabaja con tensiones altas.
- Tiempos de conmutación bajos.
- Trabaja con altas potencias.
- Pérdidas bajas a altas tensiones y potencias.
- Bajos tiempos de respuesta (t_{on} , t_{off}), para conseguir una alta frecuencia de funcionamiento.

➤ Inconveniente:

- El paso de bloqueo a conducción y viceversa no se hace instantáneamente, sino que siempre hay un retardo.

3.2.5. SISTEMAS DE REGULACIÓN DE LOS MOTORES DE CONTINUA

Los motores de excitación serie no se van a considerar para el estudio de los sistemas de regulación, únicamente se considerará el control de un motor con excitación independiente ya que su uso está más extendido.

La regulación de velocidad de un motor de corriente continua con excitación independiente se realiza a flujo (Φ) constante. Esto implica, ya que el flujo es directamente proporcional a la corriente de

inductor, que se alimenta el inductor a tensión constante (V_f) y se regula la tensión de inducido (V_a).
[22]

3.2.5.1. Regulación en lazo abierto

Este sistema de regulación consiste en fijar la corriente de excitación (I_f) en un valor constante y variar la velocidad del motor (w) controlando la tensión de alimentación del inducido (V_a).

La función del bloque convertidor consiste en convertir la potencia eléctrica de corriente y tensión de un valor determinado, a otra forma de tensión y corriente. Trata de que se pierda el mínimo de energía ya que se incurriría en un coste y una disipación de calor.

Se aplican las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$I_f = cte$$

$$E = M * I_f * w_m; \text{ como } M * I_f = cte = K' \rightarrow E = K' * w_m \quad (3.10)$$

$$V_a = (R_a * I_a) + E; \text{ podemos decir que } R_a * I_a \cong \text{despreciable} \rightarrow V_a \cong E \quad (3.11)$$

En la figura 49 se representa un esquema de dicha regulación.

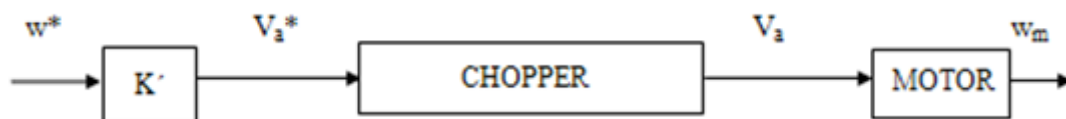


Figura 49. Esquema de un sistema de regulación en lazo abierto. [22]

Se introduce en el sistema una referencia de velocidad del motor (w^*) que al multiplicarse por el factor K' impone una entrada de tensión en el chopper ($V_a^*=E$). El chopper introduce en el motor una tensión de alimentación (V_a) adecuada para que la máquina gire a una velocidad determinada (w_m).

El control en lazo abierto es el más barato de todos los que se estudiarán en este punto pero introduce un error que aumenta con la carga $R_a \cdot I_a$ debido a la aproximación del valor de V_a a E despreciando este término, tal y como se hizo en la ecuación 3.12.

3.2.5.2. Regulación en lazo cerrado (bucle único)

En este tipo de regulación, se utiliza un regulador PI el cual está formado por una parte proporcional (P) y una parte integradora (I).

La parte proporcional (P) introduce la relación entre w_m y E a través de un valor K' . Debido a que el valor de E se aproxima al de V_a , la K' relacionará del mismo modo la velocidad w_m con V_a .

La parte integradora (I) elimina el error entre la referencia de velocidad w^* y la velocidad real del motor, w_m .

El encoder se encargará de realizar la medida de velocidad real de salida del motor.

El bloque convertidor realiza la misma función que en el apartado anterior.

En la figura 50 se representa un esquema de dicha regulación.

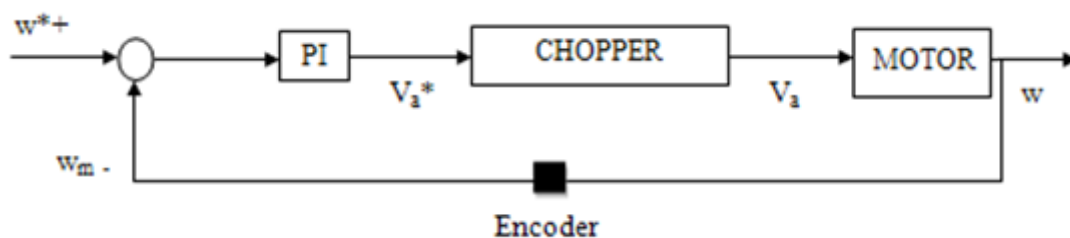


Figura 50. Esquema sistema de regulación lazo cerrado con único bucle de control. [22]

El regulador PI es un dispositivo sencillo de ajustar para obtener un error nulo (parte I) y una buena respuesta dinámica (parte P) pero este tipo de regulación tiene el inconveniente de no controlar los valores de la corriente de salida del motor (I_a)

3.2.5.3. Regulación en lazo cerrado (doble bucle anidado)

En este último esquema de regulación, se utilizan dos reguladores PI para poder controlar tanto la tensión introducida en el motor (V_a) como la corriente de salida en el mismo (I_a).

Es habitual enlazar dos bucles de control en el que el más externo elabora consignas de control para el bucle interno. Con esto se mejora la dinámica del conjunto y se controlan los valores de variables como la corriente de inducido (I_a).

El ajuste de los reguladores se puede hacer para tener un error nulo de velocidad con una cierta dinámica o para adecuar la dinámica de la respuesta ante variaciones del par de carga.

La función del bloque convertidor sería la misma que en los reguladores anteriores.

En la figura 51 se representa un esquema de dicha regulación.

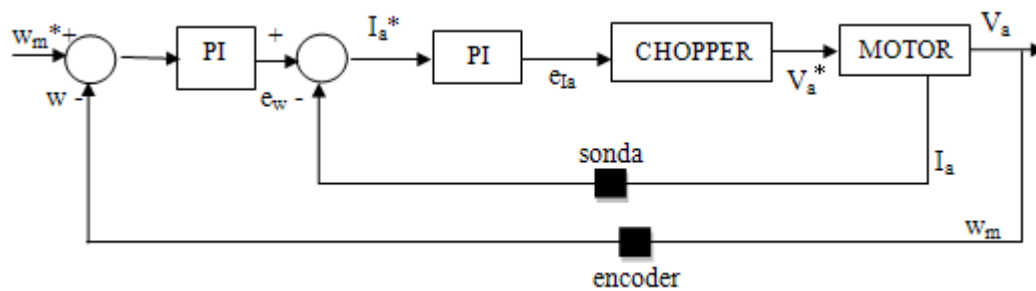


Figura 51. Esquema de un sistema de regulación en lazo cerrado con dos bucles de control anidados.
[22]

Las ventajas de este sistema de regulación son que puede ajustar mejor las dinámicas de corriente y velocidad y que no permite sobrecorrientes, la desventaja es que el diseño de ambos lazos debe ser tal que el lazo interno sea más rápido que el externo pero su correcto funcionamiento.

3.3. CONTROL PARA MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

En este punto se estudiarán los motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla. La consideración de uso de motores de jaula de ardilla en vez de los de rotor devanado se justifica por el precio más bajo de los primeros.

La elección de un motor trifásico en vez de uno monofásico se basa en que los motores monofásicos de inducción experimentan una grave desventaja. Puesto que sólo hay una fase en el devanado del estator, el campo magnético en un motor monofásico de inducción no rota. En su lugar, primero pulsa con gran intensidad, luego con menos intensidad, pero permanece siempre en la misma dirección. Puesto que no hay campo magnético rotacional en el estator, un motor monofásico de inducción no tiene par de arranque, es por ello que se emplean diversos métodos para iniciar el giro del rotor.

Los tipos de control para motores de inducción que se van a estudiar son dos, el control escalar y el control vectorial. El control escalar se mencionará sin entrar en detalle ya que es un sistema de control que, para este tipo de máquinas, está en desuso debido a su respuesta dinámica lenta y a sus peores prestaciones frente al control vectorial.

Un esquema del circuito para el motor de corriente alterna a regular se representa en la figura 52:

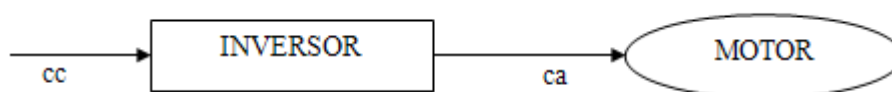


Figura 52. Esquema del circuito de control de la máquina de alterna.

El funcionamiento de este circuito es sencillo y está basado en la forma de actuar del inversor. El inversor se encarga de convertir la energía eléctrica de la fuente de continua (en este caso la batería) en una salida de alterna a frecuencia variable y tensión o corriente ajustable.

3.3.1. MOTORES DE JAULA DE ARDILLA

3.3.1.1. Funcionamiento. Ecuación del par

Los motores de jaula de ardilla basan su funcionamiento en la existencia de un campo magnético rotativo producido por el devanado del estator que induce

En el estator de una máquina eléctrica trifásica de jaula de ardilla se encuentran dispuestos tres devanados desfasados entre sí 120° geométricos. Cada uno de ellos está conectado a una fase de una red

eléctrica trifásica por lo que generan una fuerza magnetomotriz que induce corrientes en el devanado rotórico.

La interacción entre las corrientes inducidas y el flujo magnético del entrehierro determina un par de giro sobre el rotor.

Si se estudia la máquina de alterna en detalle, se puede deducir un circuito equivalente de la misma como el representado en la figura 53:

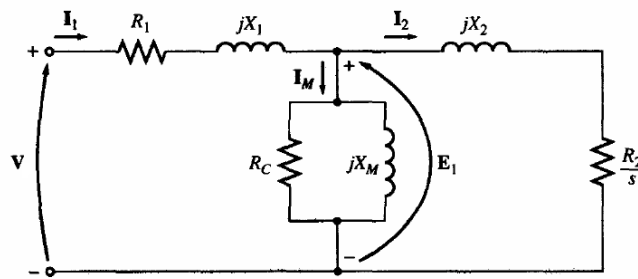


Figura 53. Circuito equivalente de la máquina de inducción.

De este circuito aproximado se pueden obtener las ecuaciones matemáticas que rigen su funcionamiento y que se recogen a continuación [24]:

$$V = E_1 + [I_1(R_1 + jX_1)] \quad (3.12)$$

$$E_1 = 4,44 * K * N * f_1 * \Phi_1 \quad (3.13)$$

$$V_1 = (R_1 * I_1) + \frac{d\Phi_1}{dt} + jw_1\Phi_1 \quad (3.14)$$

$$0 = (R_2 * I_2) + \frac{d\Phi_2}{dt} + jsw_1\Phi_2 \quad (3.15)$$

$$\phi_1 = L_1 * I_1 + L_m * i_1 \quad (3.16)$$

$$\phi_2 = L_2 * I_2 + L_m * i_1 \quad (3.17)$$

donde:

R_1 es resistencia del estator.

R_2 es resistencia de rotor.

s es deslizamiento.

R_c es resistencia del hierro.

X_M es reactancia de magnetización.

X_1 es reactancia del estator (con L_1 , inductancia del estator).

X_2 es reactancia del rotor (con L_2 , inductancia del rotor).

V es tensión en el rotor

E_1 es fuerza electromotriz.

I_1 es corriente estatórica.

I_2 es corriente rotórica.

I_M es corriente magnetizante.

N es número de espiras en serie por fase.

K es, junto con N , el tipo de arrollamiento, es un parámetro constructivo de la máquina.

f_1 es frecuencia.

ϕ_1 es flujo magnético del estator.

ϕ_2 es flujo magnético del rotor.

La resistencia que provoca en entrehierro es despreciable frente a los efectos de la reactancia de magnetización por lo que, el circuito se puede aproximar al recogido en la figura 54:

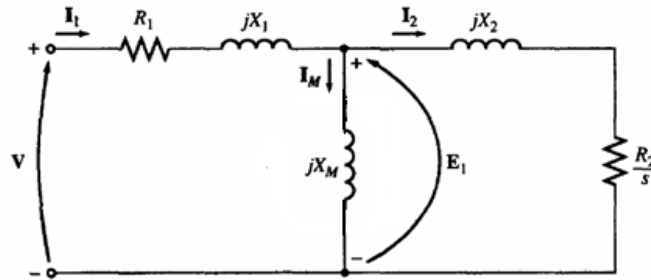


Figura 54. Circuito equivalente aproximado de la máquina de inducción [24].

Cuyas ecuaciones importantes para el control son [22]:

Para el flujo:
$$\Phi_m = \frac{1}{4,44 \cdot k \cdot N} \cdot \frac{E_1}{f_1} \quad (3.18)$$

Para el par:
$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot (\Phi_m \wedge I_1) \quad (3.19)$$

donde:

p: pares de polos de la máquina

L_1 y L_2 : valores de las bobinas de estator y rotor respectivamente.

Los motores de inducción rotan a una velocidad que es un poco menor que la velocidad sincrónica del campo rotatorio. La velocidad sincrónica del campo rotatorio está determinada por el número de polos del devanado del estator y de la frecuencia del voltaje ca aplicado.

$$n_{\text{sinc}} = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.20)$$

donde:

f es la frecuencia en Hz del voltaje aplicado al estator

p es el número de polos del devanado del estator



La relación existente entre la velocidad de giro de rotor y de estator viene determinada por una expresión que depende del deslizamiento de la máquina, de este modo:

$$s = \frac{n_{sinc} - n}{n_{sinc}} \quad (3.21)$$

donde:

n_{sinc} es la velocidad de sincronismo o la velocidad que adquiere el estator

n es la velocidad del rotor

3.3.2. MÉTODO DE CONTROL DE LOS MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

A continuación se exponen los métodos de control existentes para los motores de corriente alterna.

3.3.2.1. Control escalar de motores de inducción

De las ecuaciones 3.20 y 3.21 se pueden deducir las variables sobre las que será necesario actuar para realizar el control de este tipo de motores. Es necesario controlar la velocidad, por lo que se actuará sobre:

- Los pares de polos (p)
- La frecuencia de alimentación (f_1)
- El deslizamiento (s)

Existen dos técnicas para variar la velocidad de un motor de inducción de acuerdo a los parámetros anteriormente mencionados.

3.3.2.1.1. Variar el deslizamiento del motor para una carga dada

Las figuras 55 y 56 presentan la curva característica par-velocidad de un motor de inducción.

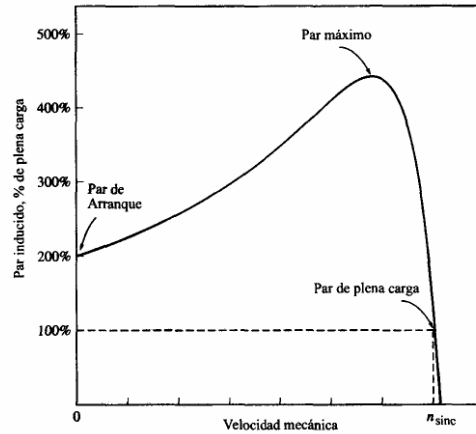


Figura 55. Curva característica típica par-velocidad de un motor de inducción. [24]

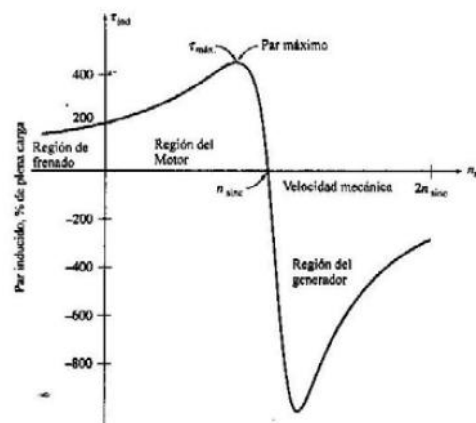


Figura 56. Curva característica par-velocidad de un motor de inducción que muestra los rangos extendidos de operación. (Región de frenado y región de generación.) [24]

En estas figuras se puede observar que el par inducido del motor es cero a la velocidad sincrónica. La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga. En este rango, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, por lo tanto la corriente, el campo magnético del rotor y el par inducido crecen linealmente cuando crece el deslizamiento. Existe un par máximo posible que no puede ser excedido. Este par, llamado par máximo o par de desviación, equivale a 2 ó 3 veces el par nominal de plena carga del motor. El par inducido en el motor, para un deslizamiento dado, varía con el

cuadrado del voltaje aplicado. En base a éstas características es posible controlar la velocidad del motor de inducción.

El método de variar el deslizamiento del motor para una carga dada se puede implementar cambiando el voltaje en la línea o cambiando la resistencia del rotor. En el primer caso la velocidad del motor puede ser controlada en un rango limitado, en el segundo caso, si se cambia la resistencia del rotor se reduce en gran manera la eficiencia de la máquina.

3.3.2.1.2. *Variar la velocidad sincrónica*

En esta técnica, tal como su nombre lo indica, se hace variar la velocidad sincrónica del motor, esto es, se varía la velocidad de los campos magnéticos del rotor y del estator. Se logra variar la velocidad del motor debido a que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de n_{sinc} . Este tipo de control se puede llevar a cabo mediante dos maneras que se explican a continuación.

✓ Variando la frecuencia eléctrica

En variadores de velocidad electrónicos para motores de alterna, la frecuencia del voltaje aplicado al estator se varía para cambiar la velocidad sincrónica. El cambio en la velocidad sincrónica produce entonces un cambio en la velocidad del eje del motor.

Utilizando control de frecuencia variable, es posible ajustar la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad base. Un controlador de frecuencia variable para motor de inducción, diseñado adecuadamente, puede ser muy flexible y puede controlar la velocidad de un motor de inducción sobre un rango de velocidad que va desde cero, hasta cerca del doble de la velocidad base. Sin embargo, es importante respetar ciertos límites de voltaje y par sobre el motor cuando varía la frecuencia para asegurar una operación confiable.

✓ Cambiar el número de polos de la máquina

Se basa en el hecho de que el número de polos de los devanados del estator de un motor de inducción se puede cambiar con facilidad en relación 2:1 con efectuar cambios en la conexión de las bobinas. Como método de control de velocidad sólo puede utilizarse para producir velocidades relativamente fijas para un motor de inducción cuya velocidad varía sólo ligeramente (del 2% al 8%), desde vacío hasta plena carga.

Por lo tanto, se requiere de un motor especial que posea los devanados necesarios y las terminales llevadas al exterior del estator para intercambio de polos. Aun así, no se puede conseguir un control gradual de la velocidad. Las velocidades obtenidas están en relación 2:1 y no se pueden conseguir velocidades intermedias mediante los procedimientos de conmutación.

3.3.2.2. Control vectorial de motores de inducción

El control vectorial, también conocido por los nombres de control de campo orientado (FOC) o control vectorial del flujo (FVC), constituye el método de regulación más extendido para máquinas asíncronas.

Las mejores prestaciones, el bajo coste y el amplio rango de operación que ofrecen propician su aplicación en detrimento del control escalar antes mencionado.

La base de este método de regulación es controlar tanto la magnitud como la fase del flujo magnético del motor asíncrono para conseguir un funcionamiento análogo al de los motores de continua en el que la fuerza magnetomotriz del inducido es perpendicular a la fuerza magnetomotriz del inductor, estando las corriente de inductor e inducido desacopladas. Con esto, manteniendo la corriente de excitación constante, los cambios de par seguirán los cambios en la corriente aplicada al inducido instantáneamente. Es decir, para controlar el flujo de la máquina se deberá actuar sobre la corriente del estator, según puede comprobarse con las ecuaciones 3.15 y 3.17, mientras que si queremos controlar el par, actuaremos sobre la corriente del estator, según se puede comprobar con la ecuación 3.19, sin que la modificación del par afecte al flujo de la máquina y viceversa.

A continuación se explicará brevemente cual es la forma de actuar de un inversor y que elementos electrónicos se utilizan en ellos. Para acabar este punto, se detallaran los distintos sistemas de regulación que se pueden aplicar y que dispositivo electrónico se debe utilizar para obtener mejor eficiencia en este bloque de la cadena.

3.3.3. CIRCUITO DE CONMUTACIÓN. INVERSOR

3.3.3.1. Detalle del funcionamiento

La función de un inversor es convertir la energía eléctrica de la fuente de continua (batería) en una salida de alterna de frecuencia variable con tensión o corriente ajustable al valor deseado.

El circuito, tal y como puede verse en la figura 57, está compuesto por diodos e interruptores en paralelo (en este caso son IGBT's que corresponde a los dispositivos Q_1 a Q_6).

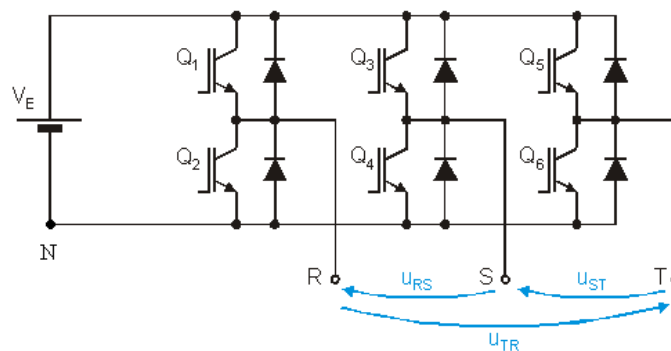


Figura 57. Circuito representativo de un inversor trifásico. [23]

En este caso se ha elegido la representación de un circuito trifásico aunque no es el único tipo de inversor que existe como se verá más adelante.

El funcionamiento de este circuito trifásico es sencillo. Se inyecta la tensión por parte de la fuente de continua V_E y se van conmutando los interruptores de forma que entre cada fase, R, S o T, y el neutro de tensión del circuito, N, aparezcan las formas de onda representadas en la figura 58.

En ellas vemos que las señales de gobierno de los interruptores de cada rama se desfasan 120° respecto a las otras ramas para obtener un sistema trifásico.

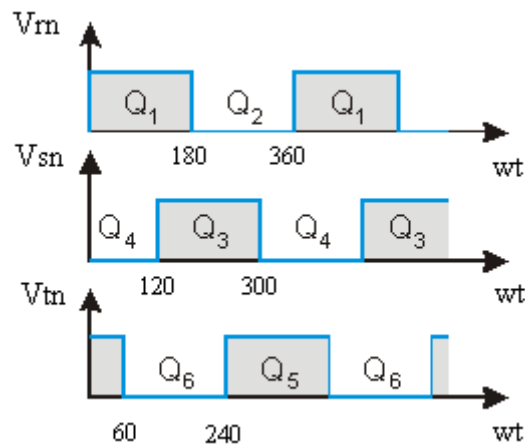


Figura 58. Formas de onda de las tensiones fase-neutro del circuito inversor en función del ángulo de conmutación (wt). [22]

La forma de onda de tensión entre fases serán las que se recogen en la figura 59.

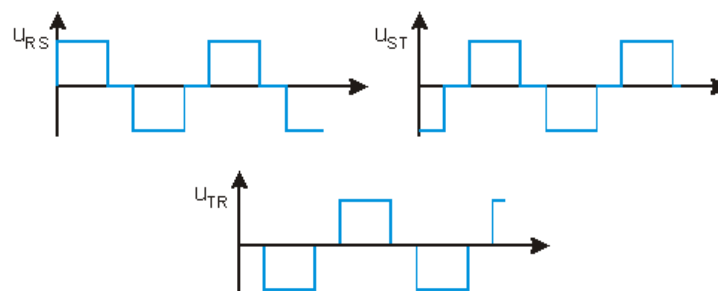


Figura 59. Formas de onda de tensión entre fases R, S y T del sistema resultante. [22]

La forma de onda final resultante posee un primer armónico cuya forma es muy semejante a la onda senoidal por lo que es esta la que se utiliza como salida del circuito.

En la figura 60 se pueden ver cuatro gráficos. En el primero de ellos se encuentran las formas de onda superpuestas que se producen por la combinación de la tensión en la fase T con ella misma y las fases R y S.

En el segundo y tercer gráficos, se muestran las formas de onda de las tensiones fase R y S con el neutro N.

Por último, tenemos en el cuarto gráfico las formas de onda de ese primer armónico de frecuencia de la tensión superpuesto con la forma de onda de la tensión entre fases (R y S) para que se pueda ver más claramente la señal resultante al aplicar el circuito inversor sobre una señal continua de alimentación.

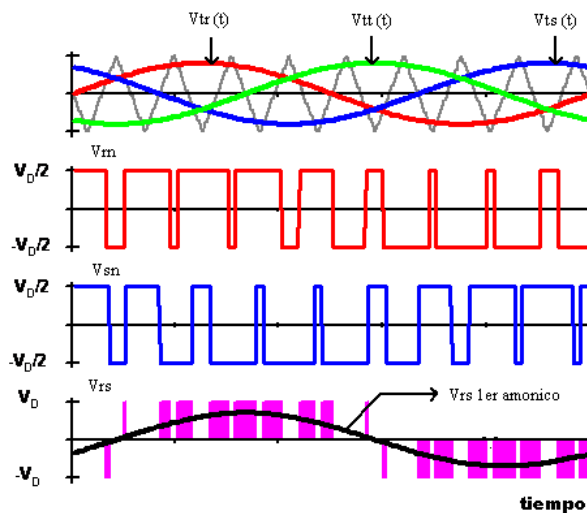


Figura 60. Gráficos obtenidos tras la conmutación en el inversor trifásico. [22]

Como se señalaba anteriormente, las formas de onda de salida del voltaje de un inversor ideal deberían ser sinusoidales aunque en la práctica posee distorsión y efectos de los armónicos de frecuencias superiores que hacen que se pierda esa idealidad. Una buena técnica para lograr la forma senoidal correcta, es utilizar la técnica de PWM logrando que la componente principal senoidal sea mucho más grande que las armónicas superiores.

Los inversores utilizan como interruptores, dispositivos electrónicos como los tiristores, los TRIAC's o los IGBT's para realizar la conmutación.

3.3.3.2. Clasificación

Existen múltiples clasificaciones de los circuitos inversores en base a varios criterios.

En este proyecto fin de carrera se va a mencionar únicamente un criterio de clasificación y es en función del tipo de señal de salida obtenida. Así, podemos tener inversores monofásico o inversores trifásicos.

3.3.3.2.1. Inversores monofásicos

Dentro de los inversores monofásicos se van a estudiar brevemente las características de los inversores monofásicos de media onda y los de onda completa.

En la figura 61 se puede ver el circuito representativo del inversor de media onda en el que la tensión de salida alterna es de valor mitad de la señal de entrada. Se produce el disparo alternado de los interruptores S1 y S2 de manera que la onda obtenida tiene forma cuadrada. El primer armónico de esta forma de onda es senoidal.

Se obtiene así una onda final senoidal de amplitud mitad de la inicial y con el desfase elegido.

En la figura 62 se contempla el otro tipo de inversor monofásico considerado. Es un inversor de onda completa debido a que el valor de tensión final obtenido es del mismo valor que el inicial.

En este caso, los interruptores conmutan de manera que la forma de onda obtenida sea una onda cuadrada cuyo armónico fundamental es senoidal por lo que se obtiene una onda alterna a la salida de amplitud igual a la entrada y con el desfase elegido.

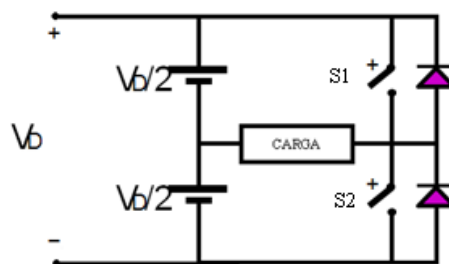


Figura 61. Circuito inversor monofásico de media onda. [23]

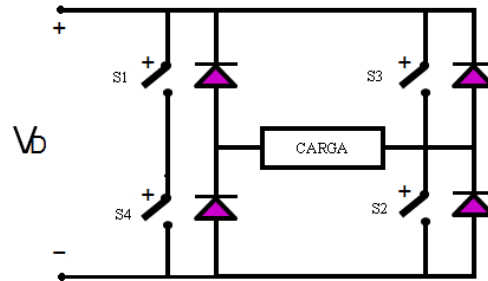


Figura 62. Circuito inversor monofásico de onda completa. [23]

3.3.3.2.2. Inversores trifásicos

Este tipo de inversores obtiene a la salida una señal senoidal trifásica debido a la conmutación de los distintos interruptores que posee de una manera concreta. El circuito representativo se recoge en la figura 57 mientras que las formas de onda obtenidas a la salida de este circuito vienen representadas en las figuras 58, 59 y 60 anteriores.

3.3.3.3. Dispositivos de conmutación

Para realizar la conmutación en los inversores, se pueden utilizar varios dispositivos electrónicos como son los tiristores, TRIAC, IGBT, etc.

A continuación se van a explicar brevemente los tiristores y TRIAC. Los IGBT's no se recogen en este apartado ya que fueron explicados en el punto 3.2.4.3, cuando se explicaban los dispositivos de conmutación para los chopper.

3.3.3.3.1. Tiristores

Los tiristores, figura 63, son interruptores electrónicos utilizados en circuitos de potencia donde es necesario controlar la activación del interruptor. Son dispositivos semicontrolados ya que se puede gobernar el encendido (paso a conducción) pero no el apagado.

Para que el tiristor entre en conducción hay que aplicar una corriente de puerta cuando la tensión ánodo cátodo sea positiva. Una vez que el dispositivo ha entrado en conducción, la señal de la puerta deja de ser necesaria para mantener la corriente de ánodo. El dispositivo continuará conduciendo

mientras la corriente de ánodo siga siendo positiva y esté por encima de un valor mínimo denominado nivel de mantenimiento.

Los tiristores pueden soportar altas corrientes y altas tensiones de bloqueo pero las frecuencias de conmutación están limitadas a valores de 20 kHz. Además, provocan alta distorsión armónica, por lo que se necesitan filtros, y un pobre factor de potencia

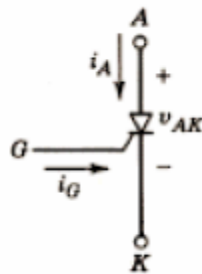


Figura 63. Esquema eléctrico de un tiristor. [23]

3.3.3.3.2. TRIAC

El TRIAC, cuyo esquema se representa en la figura 64, es un tiristor capaz de conducir corriente en ambos sentidos, por lo que se convierte en un dispositivo totalmente controlado. Se puede gobernar tanto la situación de encendido como la de apagado.

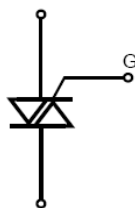


Figura 64. Esquema eléctrico de un TRIAC. [23]

El TRIAC es equivalente a dos tiristores conectados en antiparalelo, tal y como puede comprobarse en la figura 65, donde se representa el circuito equivalente de este dispositivo.

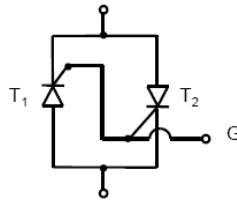


Figura 65. Circuito equivalente de un TRIAC. [23]

3.3.4. SISTEMAS DE REGULACIÓN DE LA MÁQUINA DE ALTERNA

Debido a que el control escalar es un método de control de las máquinas de alterna obsoleto, no se van a estudiar los sistemas de regulación. Este apartado se centrará en explicar cómo se controla la máquina de alterna y cuál es la topología del sistema de regulación.

Se va a explicar la transformación matemática necesaria para poder aplicar el control vectorial sobre este tipo de máquinas eléctricas para, a continuación, exponer los bucles que se deben implementar para ello.

3.3.4.1. Transformación de las ecuaciones de la máquina para el control vectorial

Para realizar el control vectorial es necesario pasar el sistema trifásico de referencias (a, b y c) de la figura 66, en el que está basado la máquina asíncrona trifásica a un sistema de ejes cartesianos (α , β) dependiente del tiempo, figura 67, utilizando la transformación Clark. De este se pasará a otro sistema de ejes cartesianos independientes de la posición angular (d, q), figura 68, por medio de la transformación Park [22].

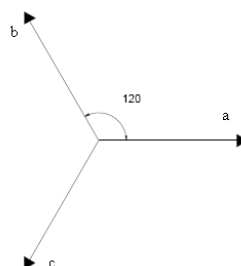


Figura 66. Sistema trifásico (a, b, c.)

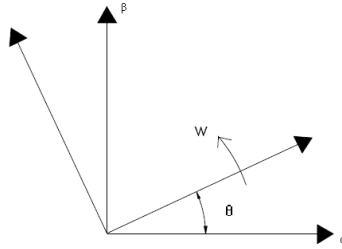


Figura 67. Sistema de coordenadas (α , β).

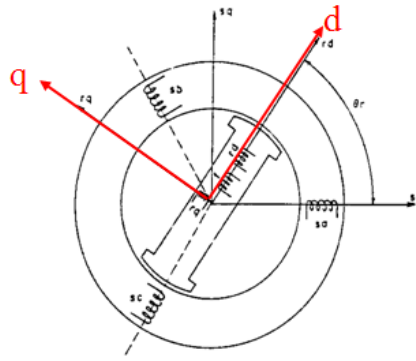


Figura 68. Sistema de coordenadas (d , q) superpuesto en el modelo de máquina.

No se incluirá el razonamiento para la obtención de las magnitudes en coordenadas (d , q) a partir de las de coordenadas (a , b , c) ya que no es objeto del proyecto. Sólo se incluirán las expresiones matemáticas.

La ecuación 3.22 indica la tensión de la máquina en ejes (d , q) a partir de los valores de tensión de ejes (a , b , c) mientras que en la segunda expresión, ecuación 3.23, se tiene la corriente de la máquina en ejes (d , q) a partir de los valores de corriente de ejes (a , b , c).

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

La primera acción a realizar para aplicar un control vectorial sobre una máquina es medir las magnitudes a controlar en el sistema trifásico (a, b, c) y pasarlo a ejes (d, q) con las ecuaciones 3.22 y 3.23.

3.3.4.2. Control vectorial de la máquina de alterna de jaula de ardilla

Como se pudo comprobar con la obtención de las ecuaciones 3.15, 3.17 y 3.19, para controlar el par de una máquina es necesario controlar la corriente del estator en su eje q mientras que para controlar el flujo de la máquina es necesario hacerlo con la corriente del estator en el eje d.

Para conocer más en profundidad sobre el control de las máquinas sería necesario desarrollar un tema que se escapa del ámbito de este proyecto por lo que sólo se incluirán los diagramas de bloques de los métodos de control más utilizados. Estos controles son el control directo y el control indirecto.

3.3.4.2.1. *Control directo*

En la figura 69 se puede observar el diagrama de bloques que corresponde al control vectorial de tipo directo.

En este método de control, las medidas de par y flujo pueden realizarse directamente o mediante observadores que se basan en las medidas de otras variables para obtener estas.

Si se observa el diagrama de bloques del control directo se puede ver como se controla el flujo por medio del control de la corriente en el estator en eje d (isd) mientras que el control de velocidad y, por lo tanto de par, se realiza por medio del control de la corriente del estator en eje q (isq).

Se produce la transformación de ejes (a, b, c) a (d, q) por la aplicación de constantes y factores de giro, y se mide la posición del flujo de la máquina.

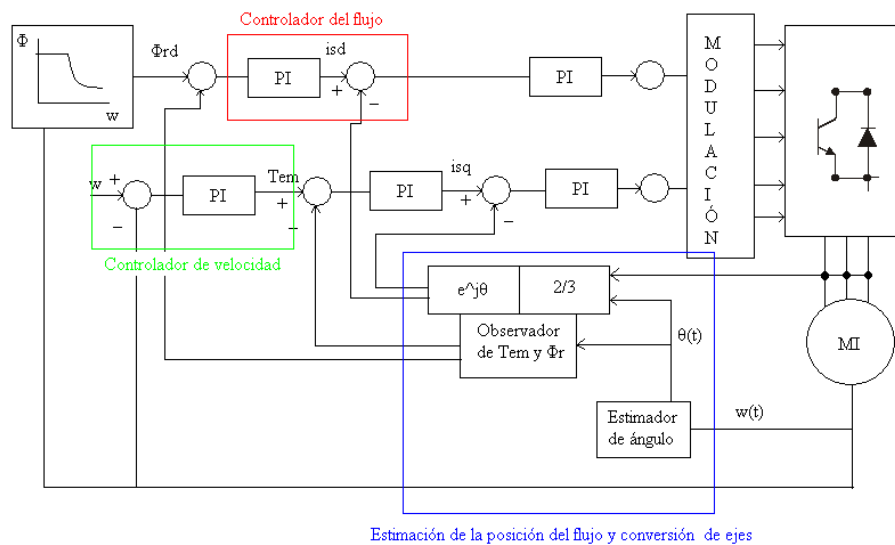


Figura 69. Diagrama de bloques del control vectorial de tipo directo. [22]

3.3.4.2.2. Control indirecto

El diagrama de bloques del control indirecto se puede ver representado en la figura 70.

Este método de control no utiliza observadores de par o flujo por lo que su implementación es más sencilla. Los lazos cerrados de flujo y par que había en el control directo son sustituidos por características sensibles a las variaciones en los parámetros de la máquina.

El resto del diagrama de bloques es análogo en funcionamiento al anterior.

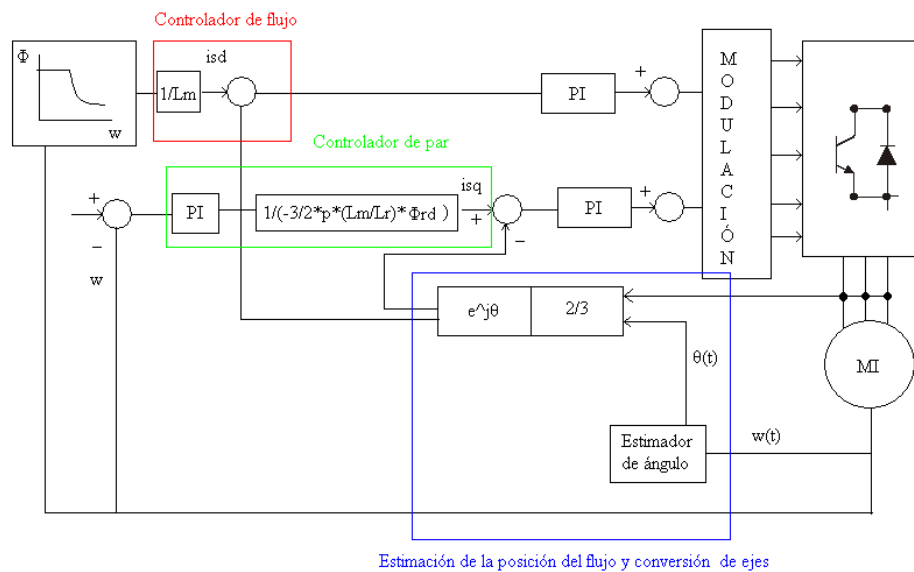


Figura 70. Diagrama de bloques del control vectorial de tipo indirecto. [22]

3.4. SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CONMUTACIÓN

La elección del dispositivo concreto para una aplicación determinada viene fijada por la carga que se debe alimentar, es decir, por la aplicación concreta, y además por una serie de factores que implican tanto al propio interruptor como al circuito en el que va a ser incluido.

Estos factores podemos resumirlos en los siguientes:

- Tensión y corriente nominal (potencia que es capaz de manejar).
- Caída de tensión en conducción (perdidas en conducción).
- Sobrecargas y transitorios (protecciones).
- Potencia a conectar y cortar.
- Corrientes de fuga admisibles (perdidas en conmutación).
- Circuito de gobierno (complejidad, peso, precio, tamaño).
- Condiciones ambientales de funcionamiento.
- Precio del dispositivo.



Los tiristores presentan mayores valores nominales de tensión y corriente y también son más robustos, con bajas pérdidas en conducción y baratos, pero conmuta con lentitud y presenta dificultades para su bloqueo.

En inversores es primordial que las conmutaciones sean rápidas y no es necesario bloquear tensiones inversas porque los interruptores tienen conectados diodos en antiparalelo. Eso hace inútil al tiristor pero permite utilizar otros: BJT, MOSFET, IGBT, GTO, etc.

Para frecuencias por encima de 100 kHz solo es posible utilizar el MOSFET. Hasta 100 kHz compiten el BJT y el IGBT que son más baratos y tienen menos pérdidas en conducción que el MOSFET, pero más pérdidas en conmutación. Hasta 15 kHz el GTO es más adecuado por su robustez y bajas pérdidas en conducción.

Cuando una aplicación obliga a fuertes conmutaciones en los interruptores, las mejoras en el encendido y apagado se traducen en una disminución de pérdidas. [25]

En la figura 71, se observan los niveles máximos de tensión y corriente a las que pueden trabajar varios dispositivos conmutadores. También se recoge en ella información sobre la frecuencia de conmutación máxima a la que se pueden utilizar.

El TRIAC y el MOSFET son dispositivos de baja potencia ya que manejan, como máximo, 40 A de corriente y 800 o 900 V de tensión respectivamente.

El GTO y el IGBT son interruptores de alta potencia ya que los niveles máximos de corriente que manejan son de entre 100 y 200 A para el primero, y entre 50 y 300 A para el segundo, con tensiones de 1200 V para el GTO y 1400 V para IGBT.

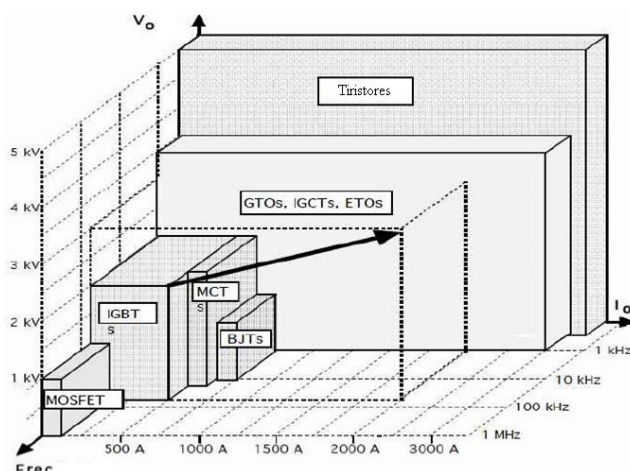


Figura 71. Máximas corrientes, tensiones y frecuencias alcanzadas por varios dispositivos de conmutación. [25]

3.5. EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL CONTROLADOR

Tanto para el control de los motores de corriente continua como para el de los motores de corriente alterna es necesario utilizar dispositivos de conmutación. En el caso de los motores de continua, estos dispositivos forman parte del chopper mientras que en los motores de alterna, de los inversores.

Durante la redacción de todo el apartado 3 se mencionaron varios dispositivos electrónicos que realizaban la labor de conmutar, como pueden ser los MOSFETS, los IGBT, los GTO, etc. Todos ellos son susceptibles de ser usados pero en este punto se analizará el MOSFET debido a que las prestaciones ofrecidas son mejores para su aplicación en la cadena energética estudiada.

3.5.1. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA DEL CONTROLADOR

La eficiencia del controlador se cuantifica comparando la potencia introducida en el mismo, que en el caso de este proyecto proviene de la batería, con la potencia de salida, que va a parar al motor.

Los controladores están contruidos utilizando dispositivos electrónicos de potencia que realizan la conmutación. Estos dispositivos, debido a sus características constructivas y a su funcionamiento, incurren en una serie de pérdidas.

Algunos de los factores que influyen en la eficiencia de los interruptores son los siguientes:

- **Potencia manejada por el dispositivo**

La tensión y la corriente presentes en el interruptor, determinan la potencia a la que trabaja. Si la corriente que circula por el dispositivo durante la conducción es de valor alto, las pérdidas serán grandes, al igual que ocurre con la tensión que soporta el dispositivo, si ésta es elevada, también lo serán las pérdidas.

- **Circuito de gobierno**

Para realizar el disparo del interruptor y hacer que pase del estado de corte al de conducción, es necesario implementar un circuito que le ofrezca una señal de corriente o tensión (en función si el dispositivo actúa con encendido por tensión o por corriente) en el punto exacto del circuito.

Este circuito disparador, en el caso de los MOSFET, deberá introducir una tensión por puerta apropiada ya que su valor influye en las pérdidas por conducción (un valor idóneo de tensión hace disminuir el valor de la resistencia a la que equivale el MOSFET)

- **Frecuencia de conmutación**

La frecuencia de conmutación de un interruptor también influye en la eficiencia ya que este parámetro hace que las pérdidas en el dispositivo aumenten si aumenta el valor de la frecuencia.

La frecuencia de conmutación se mide a través de los tiempos de subida y de bajada que necesita el interruptor para entrar o salir de conducción respectivamente.

3.5.2. ESTUDIO SOBRE LA EFICIENCIA DE LOS CONTROLADORES

Para determinar la eficiencia energética que se produce en el controlador se debe calcular o cuantificar de alguna manera las pérdidas de energía que se producen en los dispositivos electrónicos que realizan la conmutación. Esto se debe a que los métodos de control, ya sea de tipo escalar, vectorial, etc., no influyen en la eficiencia energética si no en la eficiencia del control.

En todos los dispositivos que actúan como interruptores hay que considerar las pérdidas totales, que están divididas en las pérdidas por conmutación (que corresponden a las pérdidas provocadas por el encendido y apagado del dispositivo) y las pérdidas por conducción.

3.5.2.1. Pérdidas por conmutación

Para cuantificar las pérdidas por conmutación sería necesario conocer la forma de onda de la tensión y corriente en el interruptor ya que es la convivencia de ambas magnitudes en el componente, lo que provoca disipación de energía en forma de calor [25].

Estas formas de ondas se recogen en la figura 72, donde se encuentran representadas las señales idealizadas a continuación descritas. En el primero de ellos encontramos la señal a aplicar en el interruptor para producir la conducción mientras que en el segundo se encuentra la corriente que circula por el dispositivo una vez que entra en conducción, superpuesta a la curva de tensión que soporta el interruptor.

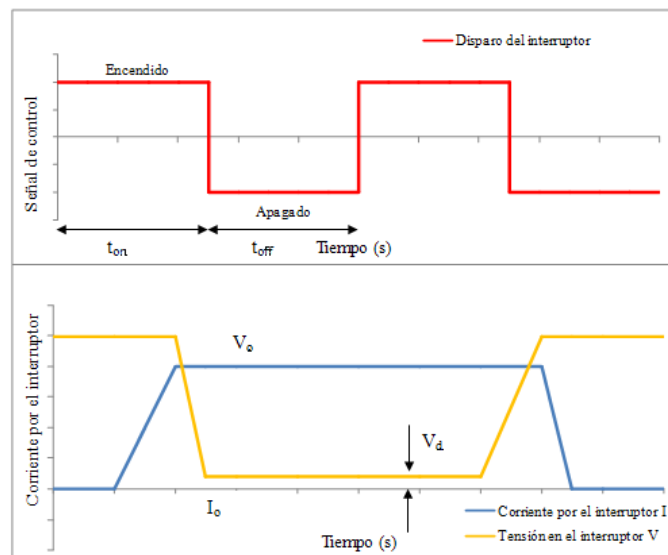


Figura 72. Formas de onda del interruptor, en conmutación. [25]

Como se puede obtener por el estudio de la gráfica anterior, la energía disipada en la transición encendido-apagado sigue la formula siguiente:

$$P_{dis} = 1/2 * V_o * I_o * t_{on} \quad (3.24)$$

donde:

V_o es la tensión en el interruptor durante el encendido/apagado.

I_o es la corriente por el interruptor durante el encendido/apagado.

t_{on} es el tiempo durante el que conduce el interruptor.

3.5.2.2. Pérdidas por conducción

Para cuantificar este tipo de pérdidas es necesario modelar eléctricamente los distintos interruptores. Este modelo representa el comportamiento de estos dispositivos antes el paso de corriente durante la conducción y a la aplicación de voltaje entre sus terminales.

Los modelos eléctricos de cada dispositivo conmutador son los siguientes [27]:

3.5.2.2.1. *Tiristor*

Para modelar el tiristor es necesario considerar la existencia de una fuente de tensión continua (V_D) y una resistencia (r_D). En la figura 73 se representa dicho modelo.

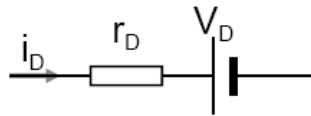


Figura 73. Modelo del tiristor.

La ecuación que recoge las pérdidas en conducción es:

$$P_{cond} = (V_D * i_D) + (r_D * i_{D,ef}^2) \quad (3.25)$$

siendo:

V_D la tensión del modelo de tiristor.

i_D la corriente que circula por el dispositivo durante la conducción.

$i_{D,ef}$ la corriente eficaz que circula por el dispositivo en conducción.

r_D la resistencia del modelo de tiristor.

Como ya se dijo anteriormente, el tiristor es un dispositivo semicontrolado. Para que conduzca se debe aplicar una corriente por puerta mientras que el apagado lo realiza el circuito externo haciendo que la corriente entre el ánodo y el cátodo se anule.

3.5.2.2.2. TRIAC

Debido a que el TRIAC son dos tiristores en antiparalelo, para cuantificar las pérdidas en conducción se utilizarán la misma ecuación y el mismo modelado eléctrico que en el tiristor.

3.5.2.2.3. MOSFET

En el caso de los MOSFET, es necesario contemplar la existencia de una resistencia (R_D) para poder obtener el modelo eléctrico del interruptor. Este modelo se recoge en la figura 74.

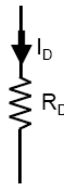


Figura 74. Modelo del MOSFET.

La ecuación de pérdidas por conducción es:

$$P_{cond} = R_D * I_{D,ef}^2 \quad (3.26)$$

donde:

R_D es la resistencia del MOSFET en el modelo.

$I_{D,ef}$ es la corriente eficaz.

Estos dispositivos se controlan por la aplicación de tensión entre la puerta y la fuente por lo que, a mayor tensión aplicada, menor es la R_D y por lo tanto menores son las pérdidas.

3.5.2.2.4. GTO

El GTO es un tiristor al que se le añade un circuito de excitación en su puerta para realizar el control del apagado. Por ello, el modelo eléctrico será el mismo que el del tiristor y las ecuaciones matemáticas para las pérdidas por conducción también serán las mismas.

3.5.2.2.5. IGBT

Para modelar un IGBT hay que considerar un modelo similar al de un transistor bipolar. Por lo tanto, hay que incluir una resistencia de pérdidas (R_D) y una fuente de tensión continua (V_{CE}). En la figura 75 se representa este modelo eléctrico.

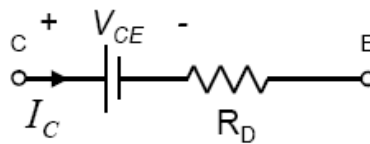


Figura 75. Modelo del IGBT.

La ecuación matemática que cuantifica las pérdidas por conducción del IGBT es:

$$P_{cond} = (V_{CE} * I_{C,med}) + (R_D * I_{C,ef}^2) \quad (3.27)$$

donde:

V_{CE} es la tensión de la fuente en el modelo (tensión emisor-colector).

$I_{C,med}$ es la corriente media por el dispositivo.

R_D es la resistencia del modelo.

$I_{C,ef}$ es la corriente eficaz por el dispositivo.

3.5.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Si se quiere llegar a una conclusión sobre la eficiencia energética de un interruptor, es necesario realizar un análisis cuantitativo teórico del mismo. De ahí que, a continuación, se detalle el

funcionamiento del MOSFET a partir de sus curvas características y se apliquen una serie de ecuaciones matemáticas con el fin de obtener datos finales sobre la eficiencia.

En la figura 76 se representa el esquema del MOSFET donde se recogen las variables analizadas, además, en la figura 77 se encuentran representadas una familia de curvas de la corriente (I_D) que circula por el MOSFET frente a la tensión (V_{DS}) que soporta.

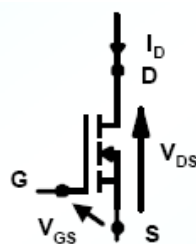


Figura 76. Esquema de un MOSFET con las tensiones y corrientes existentes.

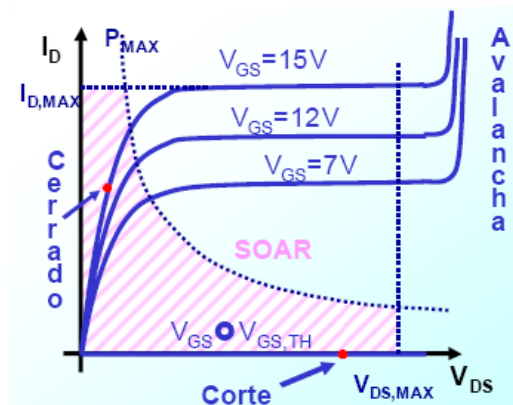


Figura 77. Curvas características del MOSFET.

El comportamiento del MOSFET es sencillo y, con ayuda del gráfico anterior, se puede explicar claramente: cuando V_{GS} es menor que el valor umbral ($V_{GS,TH}$), el MOSFET está abierto (en corte). Un valor típico de esta tensión umbral es 3V mientras que el valor límite de la V_{GS} es de $\pm 20V$.

Cuando V_{GS} es mayor de 7V el dispositivo está cerrado. Cuando conduce se comporta estáticamente con una resistencia (R_{ON}). Conociendo el valor de R_{ON} (que generalmente se incluyen en las hojas de características del componente), las pérdidas en conducción se pueden calcular con el valor eficaz de la corriente al cuadrado.

Una vez conocido el comportamiento del MOSFET, simplemente hay que obtener el gráfico de tensión y corriente sobre el dispositivo a lo largo del tiempo para la aplicación concreta, para poder calcular tanto las pérdidas en conducción como en conmutación.

Ejemplo numérico: Se tiene un MOSFET cuya resistencia posee un valor de $0,55\Omega$. La corriente de circula por él son 5A y la tensión aplicada, 150V. Del periodo T en el que funciona, el 70% del tiempo conduce mientras que el tiempo restante, $d=0,3$, permanece en corte. El dispositivo invierte 100 ns en conmutar ($t_{\text{comm}} = 100 \text{ ns}$). La frecuencia de conmutación del interruptor son 10 kHz ($f = 10 \text{ kHz}$)

En la figura 78 se recogen todos los datos de interés para el cálculo.

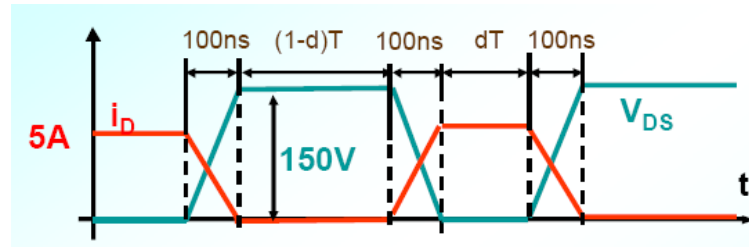


Figura 78. Curvas tensión-corriente del MOSFET.

Las pérdidas en conducción, según la ecuación 3.27, son:

$$P_{\text{cond}} = R_D * I_{D,\text{ef}}^2 = R_D * I_{D,\text{ef}}^2 = R_D * (i * d)^2 = 0,55 * (5 * 0,3)^2 = 1,23 \text{ W} \quad (3.28)$$

$$I_{D,\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} i_d * d * T} = i_d * d \quad (3.29)$$

Si se supone que el tiempo de entrada y el de salida de la conducción son iguales, las energías disipadas en ambas situaciones serán iguales ($E_{\text{ON}} = E_{\text{OFF}}$). Un esquema del punto exacto de la conmutación se recoge en la figura 79.

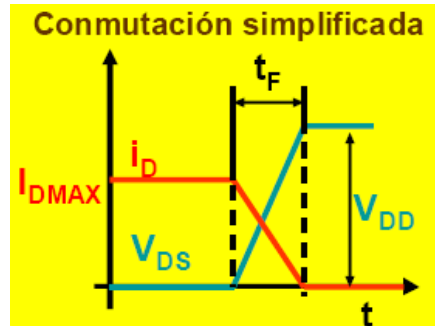


Figura 79. Tensión y corriente en el MOSFET durante la conmutación.

Las ecuaciones a aplicar en el cálculo de la energía disipada son:

$$V_{DS}(t) = V_{DD} \frac{t}{t_F} \quad (3.30)$$

$$i_D(t) = I_{DMAX} \frac{t_F - t}{t_F} \quad (3.31)$$

$$E_{OFF} = \int_0^{t_{OFF}} i_D(t) * V_{DS}(t) * dt = \frac{I_{DMAX} * V_{DD} * t_F}{6} = \frac{5 * 150 * 100 * 10^{-9}}{6} = 12,5 \mu J \quad (3.32)$$

Las pérdidas en conmutación del MOSFET, aplicando las ecuaciones 3.25, 3.30, 3.31 y 3.32, son:

$$P_{conm} = E_{ON} * f + E_{OFF} * f = 2 * E_{OFF} * f = 2 * 12,5 * 10^{-6} * 10^4 = 0,25 W \quad (3.33)$$

Por lo tanto, las pérdidas totales son de 1,5 W aproximadamente.

Si la potencia de entrada en el circuito son 750 W, tenemos que la eficiencia será:

$$\eta(\%) = \frac{P_{gen} - P_{perd}}{P_{gen}} = \frac{750 - 1,5}{750} = 99,8\% \quad (3.34)$$

donde:

η es el rendimiento o eficiencia del controlador.

P_{gen} es la potencia generada.

P_{perd} es la potencia total de pérdidas.

No se poseen datos prácticos que muestren la eficiencia real de un interruptor, por lo que el valor teórico calculado en el ejemplo anterior, es el que se dará por válido.

La eficiencia en este dispositivo, funcionando con las características de tensión, corriente, frecuencia de conmutación, etc. es muy elevada (valor cercano al 100%)

De la ecuación 3.28 se puede deducir que mientras mayor es la resistencia R_D (resistencia con la que se modela el comportamiento del MOSFET), mayor la corriente que circula por el dispositivo durante la conducción y menor sea el ciclo de trabajo ($1-d$), o lo que es lo mismo, mayor sea el periodo de tiempo donde no conduce el dispositivo (d), mayor será la potencia perdida durante la conducción.

De las ecuaciones 3.32 y 3.33 se puede determinar que, las pérdidas por conmutación en el interruptor analizado dependen de la frecuencia de conmutación, a mayores f mayores serán las pérdidas, dependen del tiempo que invierta el interruptor en pasar de conducción a apagado y viceversa, a mayores tiempos de transición mayores serán las pérdidas, e influyen los valores de corriente y de tensiones máximas que soporta el dispositivo, a mayores tensiones y corrientes mayores pérdidas.

4. PARTE III: MOTOR ELÉCTRICO

En líneas generales, un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

Tanto los motores de corriente alterna como los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estator, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

Partiendo del hecho de que cuando pasa corriente por un conductor produce un campo magnético, además si lo ponemos dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse produciendo así la energía mecánica.

4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos se clasifican en dos grandes grupos, según el tipo de alimentación eléctrica a la que se encuentren conectados. Así, se tienen:

- Motores eléctricos de corriente alterna.
- Motores eléctricos de corriente continua.

4.1.1. MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA

Los criterios aplicados para su clasificación son numerosos. Algunos de ellos se recogen a continuación:

1. Por su velocidad de giro.

Se tienen motores asíncronos o síncronos. Un motor se considera asíncrono cuando la velocidad del campo magnético generado por el estator supera a la velocidad de giro del rotor mientras que un motor es síncrono cuando la velocidad del campo magnético del estator es igual a la velocidad de giro del rotor.

2. Por el tipo de rotor.

Existen motores con el rotor de jaula de ardilla o de rotor devanado.

3. Por el número de fases de alimentación.

Se pueden encontrar motores alimentados por una única fase, motores monofásicos, por dos, motores bifásicos, e incluso alimentados por tres fases, motores trifásicos.

4.1.2. MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA

Los criterios de clasificación de los motores de corriente continua también son muy variados. En este apartado, y por ser la clasificación más común, se explicaran los tipos de máquinas de corriente continua basadas en el sistema de excitación. En la figura 80 se esquematiza la clasificación según dicho criterio.

La excitación independiente significa que la fuente de alimentación del devanado inductor es ajena a la propia máquina, es decir, la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente.

La autoexcitación, como su propio nombre indica, significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz.

El distinto modo de excitación de la máquina de continua es causa de que algunas de sus características funcionales acusen señaladas diferencias que se deben conocer si se desea obtener un mejor servicio o evitar fallos.

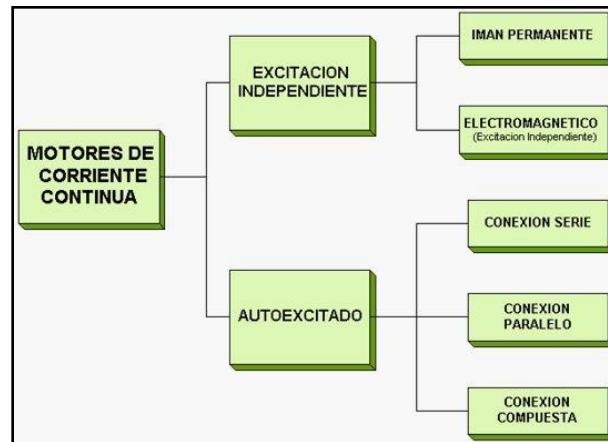


Figura 80. Clasificación de los motores de corriente continua.

A continuación se explican las características más importantes de cada tipo de motor.

4.1.2.1. Motores de corriente continua de imán permanente

En este tipo de motores se emplea un imán permanente para generar el campo magnético del estator. El resto de componentes constructivos del motor y su funcionamiento es similar a cualquier motor de alterna.

4.1.2.2. Excitación Independiente

Como se mencionó anteriormente, el motor con excitación independiente posee la fuente de alimentación del devanado inductor ajena a la propia máquina. Este circuito de vólv anteriormente, en el apartado 3.2.1 de este proyecto

El motor de excitación independiente es el más adecuado para cualquier tipo de regulación, por la independencia entre el control por el inductor y el control por el inducido.

4.1.2.3. Excitación serie

Los motores con excitación en serie son aquellos en los que el inductor está conectado en serie con el inducido. El inductor tiene un número relativamente pequeño de espiras de hilo, que debe ser de sección suficiente para que se pase por él la corriente de régimen que requiere el inducido. En los motores serie,

el flujo depende totalmente de la intensidad de la corriente del inducido. Si el hierro del motor se mantiene a saturación moderada, el flujo será casi directamente proporcional a dicha intensidad.

En este motor, la velocidad disminuye sensiblemente cuando el par aumenta y su velocidad en vacío no tiene límite teóricamente.

Este tipo de motor se vio en el apartado 3.2.2 de este proyecto.

4.1.2.4. Excitación en paralelo (shunt)

El generador con excitación shunt suministra energía eléctrica a una tensión aproximadamente constante, cualquiera que sea la carga, aunque no tan constante como en el caso del generador con excitación independiente. Cuando el circuito exterior está abierto, la máquina tiene excitación máxima porque toda la corriente producida se destina a la alimentación del circuito de excitación; por lo tanto, la tensión en bornes es máxima. Cuando el circuito exterior está cortocircuitado, casi toda la corriente producida pasa por el circuito del inducido y la excitación es mínima, la tensión disminuye rápidamente y la carga se anula. Por lo tanto, un cortocircuito en la línea no compromete la máquina, que se des-excita automáticamente, dejando de producir corriente. Esto es una ventaja sobre el generador de excitación independiente en donde un cortocircuito en línea puede producir graves averías en la máquina al no existir éste efecto de des-excitación automática.

En este tipo de motores, las bobinas inductoras (CD) van conectadas en paralelo o derivación con las bobinas inducidas (AB). Como observamos en la figura 81, de toda la corriente absorbida por la máquina (I), una parte circula por el inducido I_a y la otra por el devanado inductor I_d .

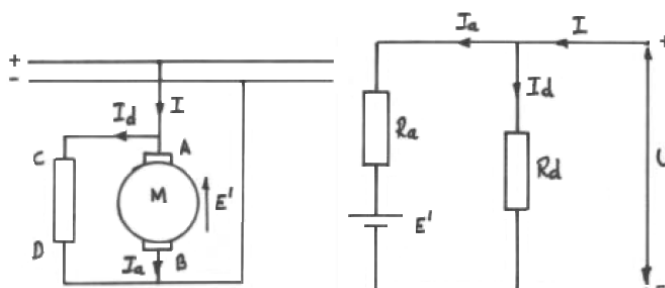


Figura 81. Esquema eléctrico de un motor en derivación.

4.1.2.5. Excitación compuesta (compound)

En este tipo de conexión, el devanado inductor se divide en dos: una parte se conecta en serie con el devanado inducido, y la otra parte en paralelo.

Es el motor cuya velocidad disminuye cuando el par aumenta y cuya velocidad en vacío es limitada. Las características del motor con excitación compuesta están comprendidas entre las del motor de derivación y las del motor en serie. En virtud de la existencia del devanado en serie, que ayuda al devanado en derivación, el flujo magnético por polo aumenta con la carga, de modo que el par se incrementa con mayor rapidez y la velocidad disminuye más rápidamente que si no estuviera conectado el devanado en serie; pero el motor no se puede desbocar con cargas ligeras, por la presencia de la excitación en derivación.

Existen dos tipos dentro de los motores de excitación compuesta, dependiendo de cómo se realice la conexión inducido-inductor tendremos dos diferentes posibilidades: los compound largos y los compound cortos. Sus esquemas eléctricos se pueden ver en la figura 82.

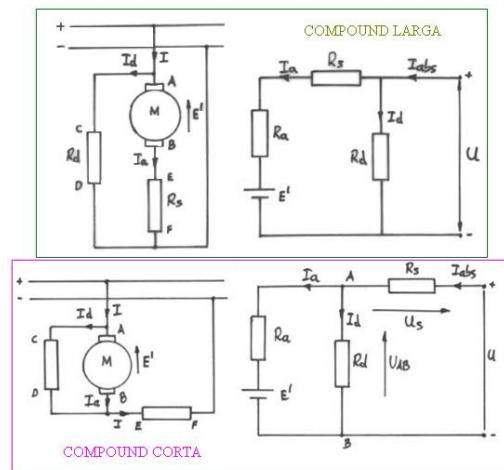


Figura 82. Esquemas eléctricos de los dos tipos de motores de excitación compuesta.

En la conexión compound larga, la corriente por el devanado inductor conectado en serie es la misma que la que circula por el devanado inducido.

En la conexión compound corta la corriente que circula por el devanado inductor en serie es la corriente total absorbida por la máquina.

4.2. TEORÍA SOBRE MOTORES

Debido al elevado número de tipos de máquinas que existen, tanto de alterna como de continua, este apartado estará centrado en estudiar los motores de corriente continua con y sin escobillas, y los motores de corriente alterna de inducción ya que son los que se utilizan con más asiduidad en la industria.

4.2.1. MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA O CONTINUA

4.2.1.1. Descripción física de un motor de corriente continua

En la figura 83 se representa el esquema de una máquina de corriente continua genérica de dos polos, que puede actuar como motor y como generador.

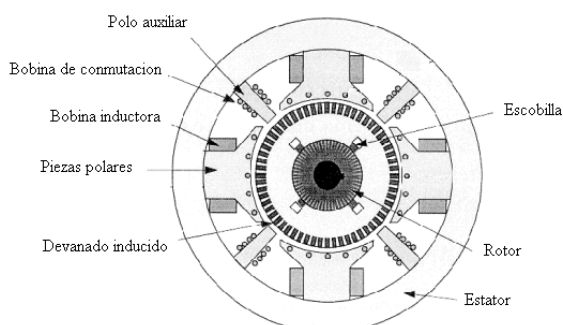


Figura 83. Partes de un motor de corriente directa o continua.

Esta máquina está constituida por los siguientes elementos:

1. El estator, que mediante el devanado inductor o de excitación es el encargado de generar y conducir el campo magnético de excitación. El estator está formado por una corona de material ferromagnético, denominada culata, en cuyo interior se encuentran dispuestos, en número par, unos salientes provistos de expansiones en los extremos, denominados polos. En torno a los polos se arrollan los devanados de excitación, que generan un campo magnético cuando circula por ellos una corriente continua.

2. El rotor, figura 84, está constituido por una pieza cilíndrica ranurada, formada por chapas de material ferromagnético para disminuir las pérdidas en el circuito magnético. En las ranuras del rotor se aloja el devanado inducido de la máquina, constituido por bobinas de hilo o de pletina de cobre; este devanado está cerrado sobre sí mismo, pues el final de la última bobina se encuentra conectado con el comienzo de la primera.



Figura 84. Rotor de una máquina de corriente continua

3. El colector de delgas, figura 85, que es un conjunto de láminas de cobre, llamadas delgas, aisladas entre sí por una capa de mica y que giran solidariamente con el rotor. Las delgas están conectadas eléctricamente a las bobinas del devanado inducido y por medio de ellas dicho devanado se puede conectar con el exterior. Cada delga está unida eléctricamente al punto de conexión de dos bobinas del devanado inducido, de tal forma que habrá tantas delgas como bobinas simples posea el devanado.

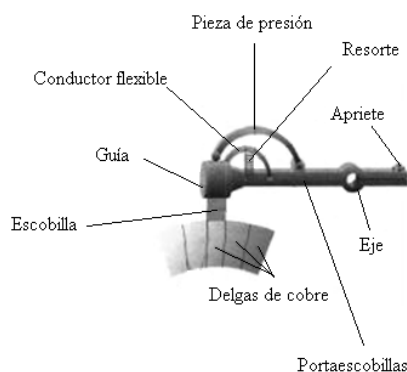


Figura 85. Esquema de un colector de delgas de una máquina de corriente continua.

4. Los portaescobillas y las escobillas, fabricados los primeros con un material estructural metálico, mientras que las segundas son generalmente de grafito. Las escobillas permanecen fijas, sin realizar movimiento alguno, y al deslizar sobre ellas el colector de

delgas se efectúa el contacto eléctrico entre el devanado inducido y los bornes de conexión de la máquina al exterior.

Hay que destacar la existencia de motores que carecen de escobillas.

5. Elementos mecánicos de soporte –como los cojinetes o rodamientos-, y de envoltura.

4.2.1.2. Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua

Los dos principios en que se basa el funcionamiento de cualquier máquina eléctrica rotativa son los siguientes:

- Cuando un conductor se mueve en el interior de un campo magnético cortando líneas de campo, se genera en él una fuerza electromotriz.
- Cuando un conductor, por el que circula una corriente, se sitúa en el interior de un campo magnético actúa sobre él una fuerza de desplazamiento.

En la figura 86 se muestra un esquema del funcionamiento de una máquina de corriente continua. En ella se representa el devanado inducido como si únicamente estuviera formado por una espira. El campo magnético creado por el devanado inductor se simboliza por medio de un par de polos. Cada extremo de la espira está unido a una delga que gira solidariamente con ella, y la corriente sale al exterior por las escobillas.

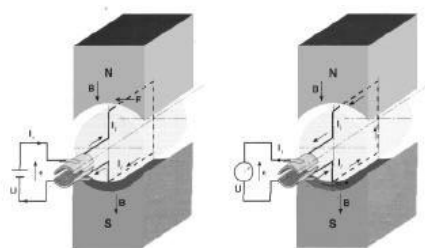


Figura 86. Esquema simplificado de funcionamiento de una máquina de continua.

Si al devanado inducido se le aplica una tensión exterior continua, por la espira circulará una corriente continua, lo que dará origen a la aparición de una fuerza que tiende a hacerla girar. De esta



manera, la espira se comporta como una máquina de corriente continua funcionando como motor. La energía eléctrica se convierte en mecánica.

Por el contrario, si al devanado inducido se le aplica un movimiento de rotación, en los bornes de la espira aparecerá una fuerza electromotriz.

En la práctica, el devanado inducido de las máquinas de corriente continua está formado por un número elevado de espiras, desfasadas espacialmente; y, por lo general, el estator dispone de más de un par de polos magnéticos.

A continuación se explicará el funcionamiento concreto de los motores de corriente continua con escobillas y sin escobillas.

4.2.1.2.1. Funcionamiento de los motores con escobillas

Estos motores están formados por dos partes fundamentales, una parte estática y otra móvil. La parte que no se mueve es la carcasa del motor, en cuyo interior y unidos a ella están situados dos imanes permanentes. A esta parte se ha denominado estator.

En el interior de esa carcasa está la parte móvil (rotor) que también se denomina inducido. Está formado por un eje metálico con tres polos que sobresalen, y en cada polo está enrollado en forma de bobina el hilo conductor. Cuando la corriente eléctrica pase por la bobina, se producirá un campo magnético que interaccionará con el campo magnético que producen los imanes del estator. La consecuencia es una fuerza que hará que gire el inducido, y por tanto el eje del motor. De esta forma se transforma la energía eléctrica, que llega al motor, en energía mecánica.

La corriente llega al inducido a través de tres delgas que están situadas en su parte superior y forman lo que se denomina el conmutador o colector. A su vez las delgas reciben la electricidad de dos escobillas, que son unos contactos deslizantes que rozan las delgas mientras el rotor gira. Como una escobilla está conectada al polo positivo de la corriente y otra al negativo, la corriente que transmiten a las tres delgas hace que el inducido gire. Son necesarias las tres delgas para garantizar que el rotor se mueva, ya que si solo hubiera dos, el rotor podría no iniciar el giro al quedar en posición perpendicular a las fuerzas magnéticas de los imanes. También hemos de saber que las escobillas se mantienen pegadas

a las delgas mediante la presión de sendos muelles. El inducido gira dentro del estator sobre rodamientos.

En la figura 87 se puede ver un ejemplo de dicho motor.

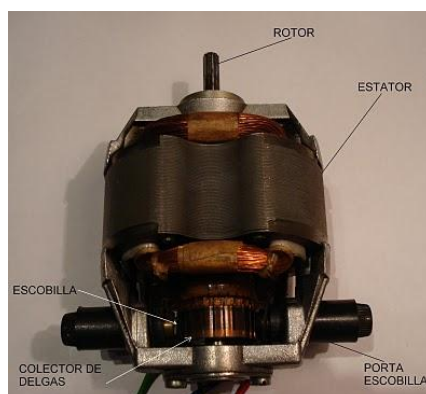


Figura 87. Esquema de un motor cc con escobillas.

4.2.1.2.2. Funcionamiento de los motores sin escobillas

Se puede decir que los motores sin escobillas son como los motores con escobillas pero del revés. Es decir el rotor, la parte móvil, está compuesto por el eje y los imanes permanentes. En la carcasa o estator es donde se encuentra el bobinado del hilo conductor, que no se mueve.

En los motores sin escobillas, la corriente eléctrica pasa por el hilo conductor que está bobinado en la carcasa y produce el campo electromagnético que hace girar a los imanes permanentes y por tanto al eje al que están unidos. Por ello ni las escobillas ni el conmutador son necesarios, ya que la corriente va al estator. Además, en los motores sin escobillas no existen las tres delgas que eran las que obligaban al rotor a moverse cualquiera que fuera su posición. Por ello en los motores sin escobillas es el variador electrónico el que controla en qué posición se encuentra el rotor para darle la corriente temporizada adecuada. Esto se realiza mediante sensores instalados en el motor o a través de la respuesta que obtiene cuando envía una corriente lineal al motor. Debido a esto los variadores electrónicos de los motores sin escobillas han de ser mucho más complejos que los usados en motores con escobillas, ya que han de procesar la información del funcionamiento del motor a tiempo real.

➤ Ventajas e inconvenientes de los motores sin escobillas:

En los motores con escobillas la conmutación se hace mecánicamente a través del contacto entre el inducido y las escobillas.

Este sistema es muy poco eficiente y el rozamiento y la resistencia eléctrica provocan que haya una gran pérdida de energía que se transforma en calor. Además esto supone una limitación al número máximo de r.p.m. de los motores, ya que a elevadas r.p.m. las escobillas rebotarían.

Para evitarlo serían necesarios muelles más rígidos y esto crearía a su vez más fricción y frenaría el giro.

En los motores sin escobillas la conmutación se controla de manera electrónica mediante el variador de velocidad, por lo que no se produce rozamiento mecánico ni pérdidas de energía y se consigue que los motores sin escobillas tengan una eficiencia muy superior, se habla de un 90%, frente a un 60% de los motores con escobillas. Debido a esto los motores sin escobillas pueden alcanzar muchas más r.p.m. y con mucho más par, hasta cuatro o cinco veces más que los motores con escobillas, y a la vez con un ahorro de energía de hasta el 30 %. Además el calentamiento del motor es mínimo.

En los motores sin escobillas la masa que gira es menor, casi la mitad, por lo que aceleran más rápidamente.

Esto se debe a que el rotor lleva los imanes, que son menos pesados en estos motores que el bobinado en los clásicos. Por ello el funcionamiento es además más suave al reducirse las vibraciones. Al no haber chisporroteo eléctrico debido al roce de las escobillas con el conmutador, se eliminan las interferencias por el "ruido" eléctrico que podrían afectar al equipo de radio. Tampoco son necesarios ni los condensadores soldados al motor ni el diodo Schottky.

En los motores con escobillas hay que realizar mantenimientos periódicos; nuevas escobillas, muelles, desgaste del conmutador y mucho tiempo dedicado a las labores de mantenimiento. Por el contrario, en los motores sin escobillas el mantenimiento es mínimo, ya que al no tener ni estas ni conmutador, el mantenimiento es casi inexistente, solo sería necesario la limpieza y lubricado de los rodamientos. Adicionalmente, el concepto de los "sin escobillas" permite fabricar motores totalmente cerrados, protegiéndolos del polvo.

Los motores sin escobillas son más sencillos y por ello más fiables: no llevan ni las escobillas, ni guías de escobillas, ni conmutador, ni muelles. Además el peso de esos motores es menor que los que poseen escobillas.

En la figura 88 se encuentra un esquema de este tipo de motor.

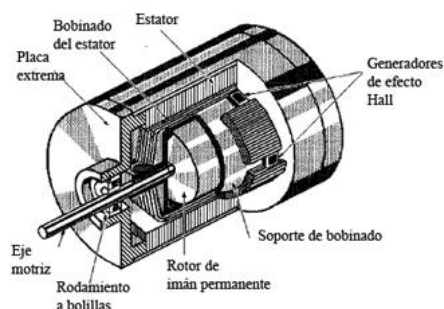


Figura 88. Esquema constructivo de un motor brushless.

4.2.2. FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

4.2.2.1. Descripción física de un motor de alterna

Los motores asíncronos constan de dos partes:

1. El estator, que es la parte fija de la máquina, está constituido por una corona de chapas magnéticas aisladas entre sí por medio de barniz, ranuradas interiormente y sujetas a una carcasa fabricada, por lo general, con fundición de hierro o aluminio. En las ranuras del estator se dispone un devanado, constituido por un número de fases igual al de la red eléctrica que alimenta el motor.
2. El rotor, que es la parte móvil de la máquina, está constituido por una corona de chapas magnéticas apiladas directamente sobre el eje de la máquina. La corona rotórica presenta una serie de ranuras interiores en las que se encuentra dispuesto el devanado rotórico.

Desde el punto de vista constructivo, tal y como se señalaba en apartados anteriores, se pueden distinguir dos formas típicas de rotor:

- Rotor de jaula de ardilla.
- Rotor bobinado.

4.2.2.2. Funcionamiento de los motores de inducción

El principio de funcionamiento de los motores asíncronos es más complejo que el de los motores de corriente continua. Se basa en la acción que ejerce sobre el rotor un campo magnético giratorio producido por el devanado estatórico.

Los motores asíncronos o de inducción, son prácticamente motores trifásicos. Están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio.

Están formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija y la otra móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor.

El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste en conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la “jaula de ardilla” o bien en uno de los extremos en el caso del rotor bobinado.

Los motores de inducción de rotor bobinado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

En la figura 89 se encuentra representado un motor de este tipo.

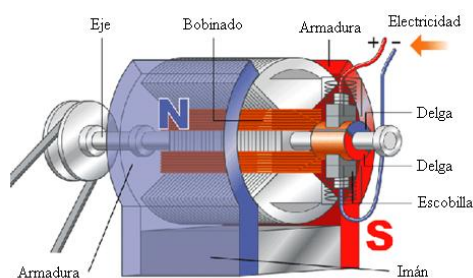


Figura 89. Esquema constructivo de un motor de inducción.

A continuación se explican brevemente las características más relevantes de los motores de inducción de rotor de jaula de ardilla y los de rotor bobinado.

4.2.2.2.1. Máquina asíncrona de rotor de jaula de ardilla

En los motores de jaula de ardilla, el devanado del rotor está constituido por barras de cobre o de aluminio colocadas en las ranuras de la corona rotórica y unidas en sus extremos a dos anillos del mismo material. El conjunto de barras y anillos tiene aspecto de jaula de ardilla, de ahí el nombre que recibe este rotor.

El par de arranque de este tipo de motores es relativamente pequeño, y la intensidad absorbida en el arranque es elevada.

En la figura 90 se puede ver una representación gráfica de las partes de una máquina asíncrona de este tipo.

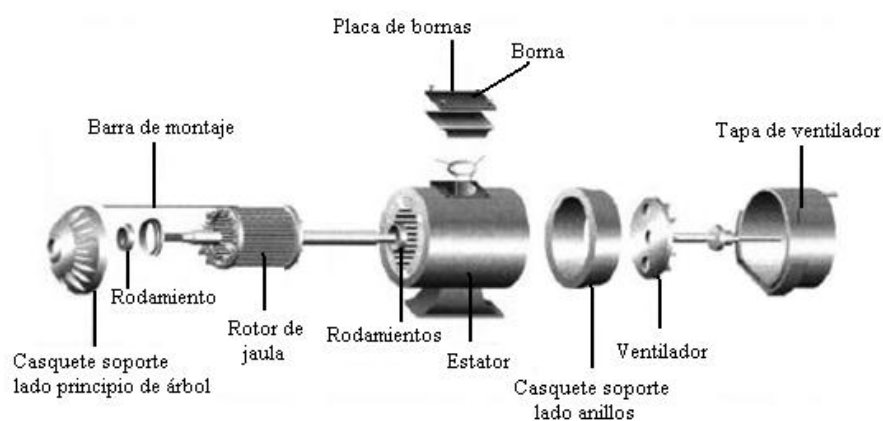


Figura 90. Máquina asíncrona de jaula de ardilla.

4.2.2.2.2. Máquina asíncrona de rotor bobinado

En los motores asíncronos de rotor bobinado, el devanado rotórico, al igual que el estatórico, está constituido por hilo de cobre.

En las ranuras de la corona rotórica se alojan, por lo general, tres devanados conectados por un punto común. Los extremos libres pueden estar conectados a tres anillos de cobre (anillos rozantes) que giran solidariamente con el eje. Haciendo contacto con los anillos rozantes, se encuentran unas escobillas, generalmente de grafito, que están fijas respecto al estator y que permiten realizar la conexión de los tres devanados rotóricos con el exterior.

Aunque desde el punto de vista constructivo el motor de rotor bobinado es más complejo y menos robusto que el de jaula de ardilla, se puede lograr un par de arranque aproximadamente 2,5 veces superior al nominal y una corriente de arranque menor que en el caso de rotor en jaula de ardilla.

En la figura 91 se representan las partes de este tipo de máquinas.

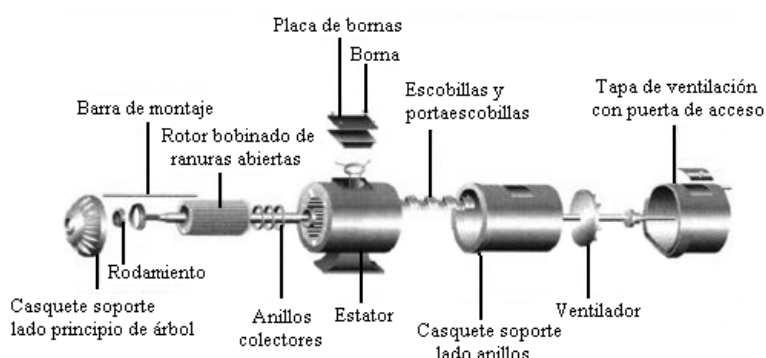


Figura 91. Máquina asíncrona de rotor bobinado.

4.2.3. MOTORES TRIFÁSICOS

Un motor trifásico está alimentado por tres tensiones alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente, valor eficaz) que presentan una cierta diferencia de fase entre ellas, en torno a 120° , y están dadas en un orden determinado. Cada una de las tensiones monofásicas que forman el sistema se designa con el nombre de fase.

En la figura 92 se pueden ver representadas las tres ondas monofásicas de tensión que alimentan al motor. El parámetro b indica el periodo de la onda mientras que el parámetro a muestra la amplitud de estas ondas de tensión.

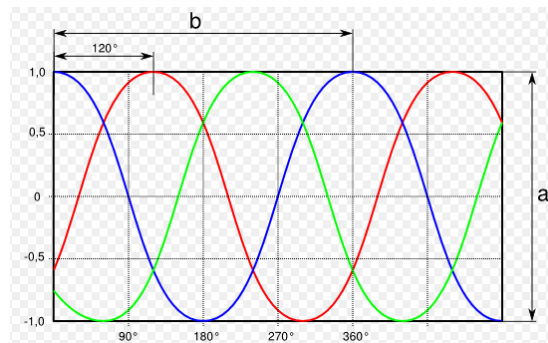


Figura 92. Formas de onda de tensión de alimentación de un motor trifásico.

El comportamiento de este tipo de motores es análogo a los motores de alterna monofásicos, solo hay que considerar la presencia de otras dos fases en la alimentación.

4.3. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

En la transformación de potencia eléctrica en mecánica, una fracción de la potencia transformada se convierte en calor y es prácticamente inutilizable, por lo que se denominan pérdidas de la máquina.

El estudio de las pérdidas en un motor eléctrico es importante ya que determina el rendimiento del mismo.

Las pérdidas que se producen en las máquinas eléctricas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Las pérdidas aproximadamente constantes, independientes de la carga.
- Las pérdidas debidas a la carga.

El rendimiento, o eficiencia, de una máquina eléctrica esta dado por la relación:

$$\eta(\%) = \frac{P_{cedida\ o\ útil}}{P_{absorbida}} * 100 = 1 - \frac{P_{pérdida}}{P_{absorbida}} * 100 \quad (4.1)$$

4.3.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

Aunque la definición de la eficiencia sea sencilla, su determinación no es tan fácil. De ahí que las normas de diversos países recojan este problema y den instrucciones detalladas sobre este particular, señalando las condiciones bajo las cuales deben ser realizados los ensayos para la determinación experimental del rendimiento.

Alguno de estas normas para la medida de eficiencia son las siguientes:

- Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, Std. 112-1978, ANSI/IEEE.
- Standard Test Code for DC Machines, Std. 113-1973, IEEE.
- Test Procedure for Single-Phase Induction Motors, Std. 114-1982, ANSI/IEEE.
- Test Procedure for Synchronous Machines, Std. 115-1965.

Uno de los procedimientos para hallar el rendimiento divide los métodos de determinación de la eficiencia en dos grupos [24]:

4.3.1.1. Métodos directos

Se miden potencia cedida y absorbida por la máquina directamente en la misma, utilizando instrumentos de medida.

4.3.1.2. Métodos indirectos

En realidad en este método lo que se miden son las pérdidas y, como esas pérdidas representan un porcentaje muy reducido de la potencia, los inevitables errores de medida no afectan en igual porcentaje al valor del rendimiento, como ocurre por los métodos directos.

Los métodos indirectos lo que hacen es medir por separado las pérdidas que se producen en la máquina para, finalmente, sumarlas.

Las pérdidas que se consideran y, por lo tanto, se miden, son:

- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el estator (campo en derivación y en serie $I^2 \cdot R$ para corriente continua).

- Pérdidas $I^2 \cdot R$ en el rotor ($I^2 \cdot R$ en la armadura, para corriente continua).
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por cargas parásitas.
- Pérdidas por fricción y acción del viento.
- Pérdidas en el contacto de las escobillas (rotor devanado y corriente continua).
- Pérdidas en el excitador (sincrónico y corriente directa).
- Pérdidas por ventilación (corriente directa).

4.3.2. NORMATIVA SOBRE EFICIENCIA

Los motores utilizan el 40% de la electricidad del mundo, de 60 a 70% en el sector industrial, y entre 30 y 40% en el sector de servicios. De toda la energía eléctrica que usan los motores, alrededor del 90% la utilizan los motores de inducción de corriente alterna entre 0,75 y 200 kW. Si estos motores fueran un poco más eficientes, las emisiones de CO₂ se recortarían drásticamente.

Comparándolos con otras máquinas, los motores eléctricos son bastante eficientes. Un motor de alta eficiencia de 90 kW convierte un 95% de la energía que utiliza en trabajo útil. Pero el gran número de motores instalados implica que unos cambios pequeños en eficiencia, supongan una gran diferencia. El objetivo de la normativa sobre eficiencia energética es conseguir mayor consistencia en la forma de medida en todo el mundo.

Se ha desarrollado mucha normativa sobre este tema en todos los países del mundo. En la figura 93 se encuentra un esquema de las distintas normas de aplicación en cada país del mundo.

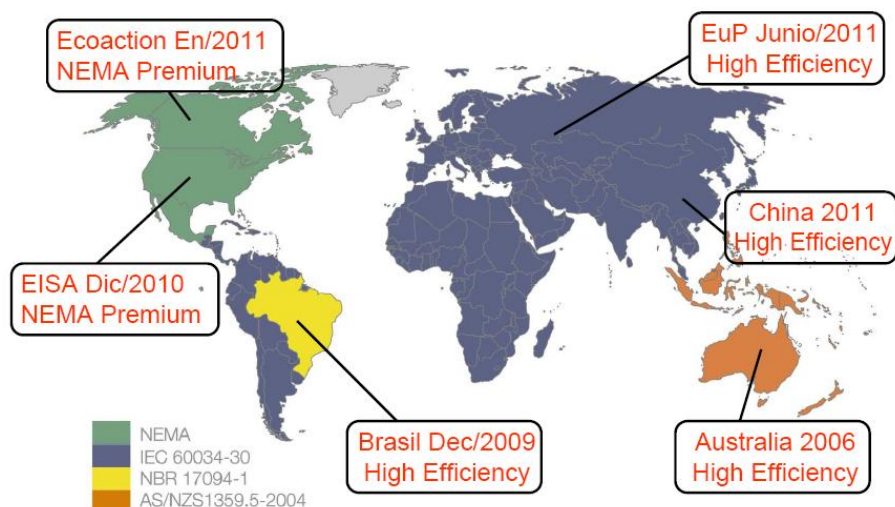


Figura 93. Visión general de las normas alrededor del mundo.

IEC y NEMA son las dos mayores normas cubriendo máquinas eléctricas. En este apartado se va a explicar en qué consiste la norma IEC (de las siglas en inglés International Electrotechnical Commission) por ser la de mayoritaria aplicación en la Unión Europea.

Con el respaldo de la Comisión Europea, los fabricantes que representaban el 80% de la producción en Europa de motores estándar acordaron en 1998 establecer tres bandas de eficiencia (Ef1- eficiencia estándar, Ef2 - alta eficiencia y Ef3 – muy alta eficiencia) para motores de inducción de 2 y 4 polos, de 1,1 a 90kW. Esta eficiencia se medía de acuerdo a una versión modificada de la norma de pruebas EN 60034-2 (1996).

En abril de 2009 entró en vigor una nueva norma internacional para probar motores eléctricos. IEC 60034-2-1: 2007-09 promete unos valores más precisos en la eficiencia e introduce un nuevo camino para actualizar el esquema de marcado en Europa.

Las modificaciones que introduce esta nueva normativa en relación a la metodología de medición de las pérdidas en el motor eléctrico se recogen en la tabla 6.



Norma anterior de medida de eficiencia EN/IEC 60034-2:1996	Norma actual de medida de eficiencia IEC 60034-2-1: 2007-09
Método directo	Método directo
Método indirecto:	Método indirecto:
Pérdidas adicionales se estiman como el 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal.	Se determinan las pérdidas adicionales por medidas a cargas parciales.
	Se estiman las cargas adicionales como el 2,5 y 0,5% de la potencia de entrada a carga nominal.
	Se establecen por cálculo matemático
Pérdidas en los bobinados de rotor y estator determinadas a 95 °C.	Pérdidas en los bobinados de rotor y estator determinadas a 25 °C + incremento de temperatura real del motor

Tabla 6. Comparativa entre normativas IEC sobre métodos de medida de eficiencias.

Después de la aplicación de esta normativa, los motores disponibles en el mercado deberán tener una cierta eficiencia para ser aptos. Estos valores de eficiencia en función del número de polos de la máquina, de la potencia y del nivel de eficiencia se reflejan en la tabla 7. Los valores de la tabla que se reflejan son para motores cuya alimentación proviene de una red trifásica a 50 Hz, en el Anexo IV se encuentran los mismos valores para una frecuencia de 60 Hz obtenida de una publicación de la empresa ABB.

Potencia de salida (kW)	IE1 - Eficiencia estándar			IE2 - Alta eficiencia			IE3 - Muy alta eficiencia		
	Polos			Polos			Polos		
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75	75	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,7	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,6	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87	87,7	86	89,2	89,6	88
7,5	86	86	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,8	92,7	93	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,2	94	93,7	94,7	95	94,6
90	93	93	92,9	94,1	94,2	94	95	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,8	94,8	95,6	95,8	95,6
De 200 a 375	94	94	94	95	95,1	95	95,8	96	95,8

Tabla 7. Niveles de eficiencia de los motores según norma IEC 60034-30.

Por lo tanto, el alcance de la nueva norma es el siguiente:

- Motores de inducción (con rotor de jaula) de velocidad única, trifásicos 50 Hz o 50/60 Hz.
- 2, 4 y 6 polos.
- Tensión nominal hasta 1000 V.
- Potencia nominal entre 0,75 kW y 375 kW.

- Diseñados para operación en régimen continuo S1 o S3 con factor cíclico de duración de 80% o superior.

Y la fecha de implementación será:

- A partir del 16 de Junio 2011, los motores no deben poseer niveles de eficiencia inferiores a IE2.
- A partir del 1 de Enero de 2015 los motores con potencia nominal entre 7,5 y 375 kW no deben poseer niveles de eficiencia inferiores a IE3 o atender al nivel IE2 y ser equipados con un convertidor de frecuencia.
- A partir del 1 de Enero de 2017 todos los motores con potencia nominal entre 0,75 y 375 kW no deben poseer niveles de eficiencia inferiores a IE3 o atender al nivel IE2 y ser equipados con un convertidor de frecuencia.

4.3.3. EFICIENCIA DE LOS MOTORES DE CONTINUA

Para calcular la eficiencia de un motor de corriente continua, se deben determinar las siguientes pérdidas, figura 94:

- Sus pérdidas en el cobre (P_j).
- Sus pérdidas por caída en las escobillas (P_{mec}) (si las hubiera).
- Sus pérdidas mecánicas (P_{mec}).
- Sus pérdidas en el núcleo (P_{fe}).
- Sus pérdidas rotacionales (P_{mec}).

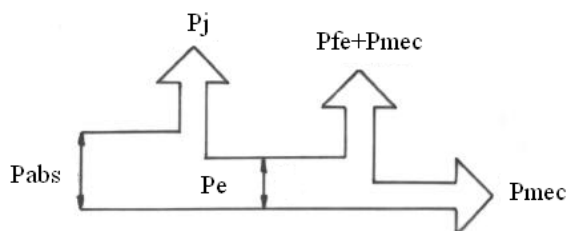


Figura 94. Esquema de pérdidas en un motor de continua.

Las pérdidas en el cobre del motor son las pérdidas I^2R en los circuitos de armadura y campo del motor. Estas pérdidas pueden encontrarse conociendo las corrientes en la máquina y las dos resistencias.

Para determinar la resistencia del circuito de armadura de una máquina, se bloquea su rotor para que no pueda girar y se aplica un voltaje pequeño a los terminales de armadura. Se ajusta el voltaje hasta que la corriente de armadura sea igual a la corriente nominal de la máquina. La relación de voltaje aplicado a la corriente circulante en la armadura es R_a . La razón para que cuando se realiza esta prueba la corriente sea aproximadamente igual al valor de plena carga, es que R_a varía con la temperatura y, al valor de corriente de plena carga, los devanados de la armadura están cerca de su temperatura normal de operación.

La resistencia obtenida no es completamente precisa, porque:

- No está presente el enfriamiento que ocurre normalmente cuando el motor está girando.
- Puesto que durante la operación normal hay un voltaje de corriente alterna en los conductores del rotor, ellos adolecen de alguna cantidad de efecto pelicular, el cual eleva adicionalmente la resistencia de armadura.

Los estándares sobre máquinas de corriente continua permiten un procedimiento más preciso para determinar R_a , el cual puede utilizarse, si se requiere.

La resistencia de campo puede determinarse suministrando el voltaje nominal de pleno campo a su circuito de campo y midiendo la corriente de campo resultante. La resistencia de campo R_c es justamente la relación del voltaje de campo a la corriente de campo.

Las pérdidas por caída en las escobillas a menudo son cargadas junto con las pérdidas en el cobre. Si se tratan separadamente, pueden determinarse de una gráfica de potencial de contacto versus corriente, para el tipo particular de escobillas que se estén usando. Las pérdidas por caída en las escobillas son justo el producto del voltaje de caída en las escobillas V_{BD} por la corriente de armadura I_a .

Las pérdidas en el núcleo y las mecánicas usualmente se determinan juntas. Si se lleva un motor a girar libre sin carga y a la velocidad nominal, no hay potencia de salida desde la máquina. Puesto que el motor está sin carga, I_a es muy pequeña y las pérdidas en el cobre de la armadura son despreciables. Por

lo cual, si las pérdidas en el cobre del campo se restan de la potencia de entrada al motor, la potencia de entrada restante consta de las pérdidas mecánicas y en el núcleo de la máquina a esa velocidad. Estas pérdidas del motor se denominan pérdidas rotacionales sin carga. En la medida que la velocidad del motor permanezca cercana a la cual fueron medidas las pérdidas rotacionales sin carga son una buena estimación de las pérdidas mecánicas y en el núcleo de la máquina bajo carga.

4.3.4. EFICIENCIA DE LOS MOTORES DE ALTERNA

Las pérdidas en las máquinas de alterna se pueden clasificar en pérdidas mecánicas y pérdidas eléctricas.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción de las partes móviles y a la acción del aire en la ventilación, de ahí que se agrupen en pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por ventilación dependen de la velocidad de la máquina, del diseño del sistema de ventilación propio y de la turbulencia producida por las partes en movimiento. Generalmente el valor de estas pérdidas se determina por pruebas en la máquina.

Las pérdidas eléctricas se componen principalmente de las siguientes componentes:

- Pérdidas en los conductores ($R \cdot I^2$), también conocidas como pérdidas en el cobre:

En los motores de inducción estas pérdidas se presentan en los conductores del estator y rotor, se manifiestan en forma de calor, produciendo una elevación de temperatura, sobre el ambiente. Algunas veces, en lugar de usar la ecuación de pérdidas $R \cdot I^2$, es preferible expresar las pérdidas en términos de W por kg del material usado como conductor para los devanados. Las pérdidas están dadas como:

$$P_c = 1000 * J^2 * \left(\frac{\rho}{D_e}\right) \quad (4.2)$$

donde:

J es la densidad de corriente del conductor en amperios/mm²

ρ es la resistividad del conductor en nano ohmios metro ($10^{-9} \Omega \cdot m$)

D_e es el peso específico o densidad del conductor en kg/m^3

Las pérdidas eléctricas de los conductores varían con la carga del motor expresada como la corriente (I). Esto se explica partiendo del hecho que operando en vacío no desarrolla ninguna potencia útil y solo se presenta las llamadas pérdidas por fricción y ventilación, las pérdidas en el hierro y las pérdidas mínimas de los conductores. En la medida en que se carga el motor, la corriente en el devanado del estator tiende a incrementarse y, en consecuencia, las pérdidas $R \cdot I^2$ aumentan con el cuadrado de esta corriente.

- Pérdidas en el hierro:

Se producen en el circuito magnético de las maquinas y se deben principalmente al efecto de histéresis y de corrientes circulantes. Las pérdidas del hierro dependen de las densidades de flujo magnético, de la velocidad de rotación del rotor, de la calidad del acero y del tamaño del rotor.

Para conocer mejor como se realiza el proceso de conversión de la energía, de la correspondiente energía eléctrica de alimentación al motor a la energía mecánica de salida en su eje, y como se produce la pérdida de energía y, por tanto, de eficiencia en el motor, se puede estudiar el diagrama de flujo de potencia activa representado en la figura 95.

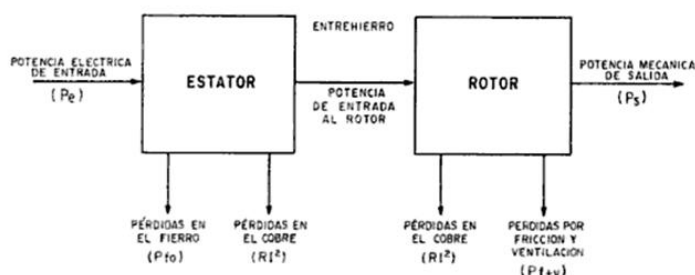


Figura 95. Diagrama de flujo de potencia activa de un motor de alterna.

El flujo de potencia se realiza de la forma siguiente: la potencia eléctrica de entrada a la maquina (P_e), que es tomada de la fuente de alimentación, llega al devanado del estator donde se presentan las

perdidas por efecto Joule ($R \cdot I^2$) de las cuales parte se disipa en forma de calor y parte se disipa como calor en el núcleo del estator y se denominan pérdidas en el hierro. El resto de potencia activa (P_r) se transporta a través del entrehierro (espacio entre el rotor y el estator) y se transfiere al rotor por inducción electromagnética.

La potencia (P_r) de entrada al rotor produce pérdidas por efecto Joule, aproximadamente una tercera parte P_{jr} se disipa como calor y el resto se encuentra finalmente disponible como potencia mecánica (P_m). Restándole una pequeña porción denominada pérdidas por fricción y ventilación ($P_f + V$) se obtiene la potencia mecánica disponible en el eje, que es la que se suministra a la carga. [28]

Otro ejemplo del flujo de potencia que se produce en un motor es el que se encuentra reflejado en la figura 96.

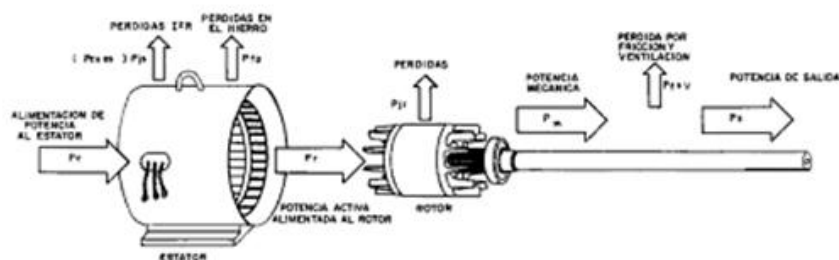


Figura 96. Flujo de potencia activa en un motor de inducción trifásico.

4.3.5. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA DEL MOTOR

La eficiencia del motor se basa en las pérdidas que se produzcan durante su funcionamiento.

Para analizar los factores que afectan al rendimiento de un motor, sea del tipo que sea, hay que fijarse en aquellos parámetros que hacen que las pérdidas modifiquen su valor.

En la tabla 8 se recoge un resumen de las principales pérdidas que sufre un motor de inducción así como una cuantificación de su efecto sobre el total de pérdidas de cada una de ellas reflejado en forma de porcentaje. En otra columna podemos ver algunos métodos para disminuirlas.

Nombre	Porcentaje del total de pérdidas	Descripción	Fijas o variables	Cómo reducirlas
Pérdidas en el núcleo	15 - 25%	Energía requerida para magnetizar el núcleo	Fijas	Mejorando la permeabilidad del acero, usando laminaciones más delgadas o modificando la longitud del núcleo.
Fricción y ventilación	5 - 15%	Pérdidas debidas a fricción y a la resistencia del aire	Fijas	Mejorando el sistema de ventilación y reduciendo la fricción de los elementos.
Pérdidas en el devanado del estator	25 - 40%	Calentamiento debido al flujo de corriente a través de la resistencia del devanado del estator	Variables	Aumentando el volumen de cobre en el devanado del estator, mejorando el diseño de las ranuras y usando aislamiento mas delgado.
Pérdidas en el rotor	15 - 25%	Calentamiento debido a las pérdidas en las barras del rotor	Variables	Aumentando el tamaño de las barras conductoras del rotor y anillos terminales.
Pérdidas dispersas	10 - 20%	Flujo disperso inducido por las corrientes de carga y otras pérdidas menores	Variables	Mejorando detalles de diseño y manufactura.

Tabla 8. Cuadro resumen de datos sobre las pérdidas en un motor de inducción. [29]

Una curva características interesante es la que representa la variación del rendimiento en régimen normal de marcha, en función de la potencia útil o de la potencia aparente, en el caso de máquinas de corriente alterna. [24]

La forma general de la curva de rendimiento es, con bastante aproximación, la misma para todas las máquinas eléctricas. Un ejemplo se puede ver en la figura 97.

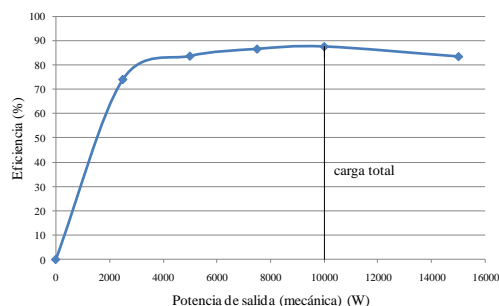


Figura 97. Eficiencia energética del motor en función de la carga. [24]

En vacío, o sea con carga útil nula, el rendimiento es cero.

Con cargas reducidas, a consecuencia de las pérdidas constantes, el rendimiento es muy bajo. Crece rápidamente al aumentar la carga, pasando por un máximo para descender, aunque más lentamente, al continuar aumentando la carga. Esto es debido a las pérdidas por efecto Joule, que dependen de la carga y varían proporcionalmente al cuadrado de la corriente generada o consumida.

El rendimiento es máximo para aquella carga para la cual las pérdidas variables alcanzan un valor aproximadamente igual a las pérdidas fijas.

Esto puede verse fácilmente escribiendo la expresión del rendimiento en la forma:

$$\eta = \frac{P_{cedida\ o\ útil}}{P_{cedida\ o\ útil} + P_{pérdidas}} \quad (4.3)$$

Escribiendo:

$$P_{útil} = kI \quad (4.4)$$

$$P_{pérdidas} = a + b * I^2 \quad (4.5)$$

siendo:

I, la corriente de carga.

a, las pérdidas fijas.

b*I², las pérdidas variables.

Y sustituyendo tendremos:

$$\eta = \frac{kI}{kI + a + b * I^2} \quad (4.6)$$

El valor máximo del rendimiento η en función de la corriente I se producirá cuando:

$$\frac{d\eta}{dI} = 0 \quad (4.7)$$

derivando e igualando a cero el numerador se tiene:

$$k(kI + a + bI^2) - (k + abI)kI = 0 \quad (4.8)$$

es decir:

$$a = bI^2 \quad (4.9)$$

El rendimiento es máximo cuando las pérdidas fijas igualan a las pérdidas variables.

De aquí se desprende que en las máquinas que tengan que trabajar permanentemente con cargas parciales conviene reducir el valor de las pérdidas constantes.

En la figura 98 se puede ver la variación de los valores de las pérdidas en función de la carga del motor.

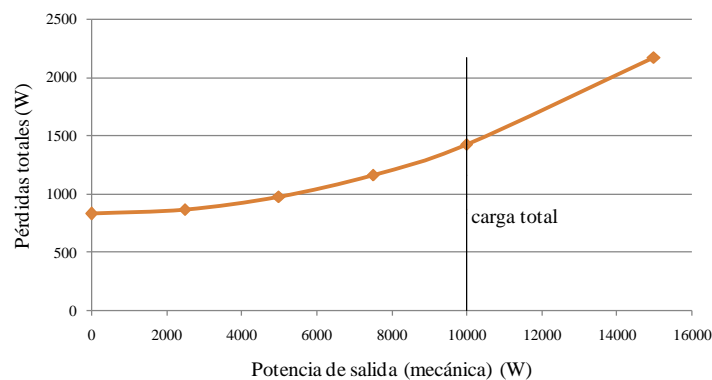


Figura 98. Pérdidas en el motor en función de la carga. [24]

Otro ejemplo de la distribución de pérdidas en un motor inducción de 1,5 kW de potencia en función de la carga se puede ver en la figura 99.

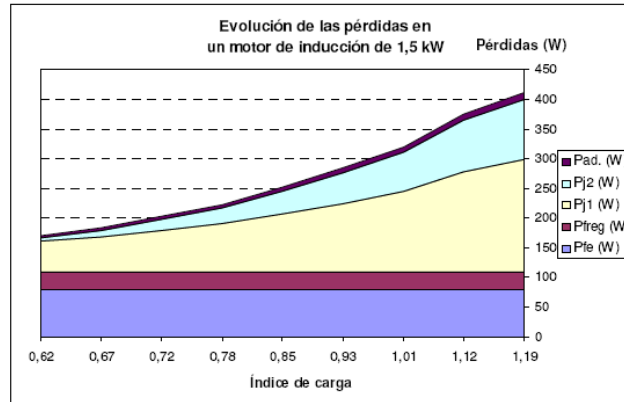


Figura 99. Resultado de la distribución de pérdidas en un motor de inducción. [30]

También se puede estudiar el efecto que tiene la variación del deslizamiento en los motores asíncronos trifásicos obteniendo una ecuación que relacione ambas magnitudes. Para ello es necesario seguir el siguiente razonamiento. La figura 100 servirá de ayuda.

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = V_1 * I_1 * \cos\varphi_1 \quad (4.10)$$

Parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica ΔP_{el} , así como una pérdida magnética en el campo del estator ΔP_{mag} , deduciendo dichas componentes al rotor, se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{elmag} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{mag} \quad (4.11)$$

Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor ΔP_{el2} en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{el2} \quad (4.12)$$

En las máquinas de anillos rozantes, además se tienen pérdidas en las escobillas de contacto, las cuales se añaden a la pérdida ΔP_{el2} .

La potencia mecánica obtenida en el árbol del eje del rotor, se obtiene luego de vencer su inercia y otras pérdidas adicionales, obteniéndose una potencia P_2 :

$$P_2 = P_{mec} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic} \quad (4.13)$$

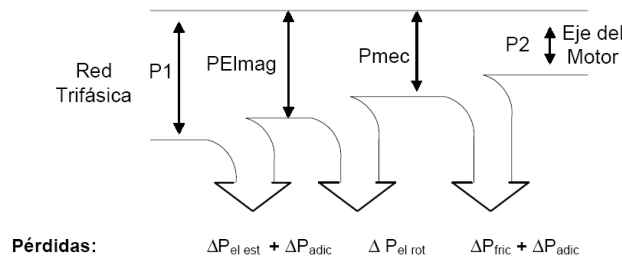


Figura 100. Diagrama de potencias de un motor asíncrono trifásico.

Para definir la relación entre la eficiencia η y el deslizamiento s en los motores, se analiza la eficiencia mediante la relación:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{elmag}}{P_1} \right) * \left(\frac{P_2}{P_{elmag}} \right) = \eta_1 * \eta_2 \quad (4.14)$$

donde, η_1 y η_2 son las eficiencias del estator y del rotor respectivamente.

Teniendo en cuenta:

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_{elmag}} = \frac{P_{elmag} - \Delta P_{el2} - \Delta P_{fric} - \Delta P_{adic}}{P_{elmag}} \quad (4.15)$$

entonces es válida la siguiente relación:

$$\eta_2 < \frac{P_{elmag} - \Delta P_{el2}}{P_{elmag}} < \frac{1 - \Delta P_{el2}}{P_{elmag}} < (1 - s) \quad (4.16)$$

Por lo tanto:

$$\eta < \eta_2 < (1 - s) \quad (4.17)$$

Del análisis realizado se puede concluir que para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento s de pequeña magnitud. Por lo general $s_{nom} = 0.01 - 0.06$, para ello el devanado del rotor lo diseñan de tal forma que tenga una resistencia óhmica pequeña.

4.3.6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para obtener valores de eficiencia óptimos de los motores eléctricos, hay que tener en cuenta que la eficiencia de cualquier tipo de motor depende estrechamente de las pérdidas que se produzcan en el mismo durante su funcionamiento.

Se ha visto que existen pérdidas constantes, como pueden ser las producidas en el núcleo o debidas a la fricción del sistema de ventilación, y también pérdidas variables en función de la carga, como pueden ser las pérdidas en el cobre.

La cuantificación de estas pérdidas sirve de ayuda para fijar el rendimiento de la máquina gracias a la aplicación de cualquiera de las ecuaciones 4.1 o 4.3.

Para actuar sobre las pérdidas fijas sería necesario tomar medidas que modifiquen constructivamente la máquina. El fenómeno de histéresis y las corrientes parásitas o corrientes de Foucault que se desarrollan en el núcleo por efecto del flujo alterno, consumen una cierta cantidad de energía. Las pérdidas magnéticas crecen rápidamente con la inducción, con el grosor de la chapa utilizada en la construcción del núcleo y con su peso. En cuanto a las pérdidas por fricción y



ventilación de la máquina, habría que mejorar el sistema de ventilación y reducir la fricción de los distintos elementos.

Para actuar sobre las pérdidas variables con la carga es necesario calcular bien el punto óptimo de trabajo donde el rendimiento de la máquina sea tal que se produzca la equiparación de las pérdidas fijas con las variables (según lo deducido de la ecuación 4.9) y, además, se deben disminuir las resistencias, tanto de estator como de rotor, a la circulación de corriente para disminuir las pérdidas por disipación de energía en forma de calor.

Además, en motores asíncronos es necesario controlar el deslizamiento con el que funciona la máquina ya que esto influirá en su eficiencia energética (como se vio en la ecuación 4.17)

Los valores de eficiencia energética de las máquinas eléctricas que se utilizan en la actualidad se suelen situar en un rango entre un 75% y un 90% como podíamos ver en la figura 97.

Para medir la eficiencia de un motor existen varios métodos normalizados en función del país donde se realiza el motor. Si la producción del motor se realiza en España, la normativa a la que hay que acogerse es la IEC 60034-2-1, que es de aplicación en toda la Unión Europea.

En el Anexo IV del presente proyecto se encuentra la nota técnica por la que ABB, una empresa fabricante de motores de corriente alterna, se rige para realizar los métodos de medida de eficiencia para motores de alterna de baja tensión. [31]

A su vez, en el Anexo V se tiene igualmente una nota técnica por la que ABB clasifica sus motores de alterna de baja tensión siguiendo los criterios de la normativa 600043-30 de eficiencia.

5. PARTE IV: SISTEMA DE TRANSMISIÓN

La transmisión es el conjunto de mecanismos (figura 101) que permiten transmitir el par motor a las ruedas, aumentándolo hasta el valor necesario para el arranque y el desplazamiento a cualquier velocidad, mediante una serie de desmultiplicaciones. Asimismo permite arrancar el vehículo desde parado, mantener el motor en marcha estando el vehículo inmóvil y permitir su movimiento hacia atrás, por ejemplo, para aparcar.

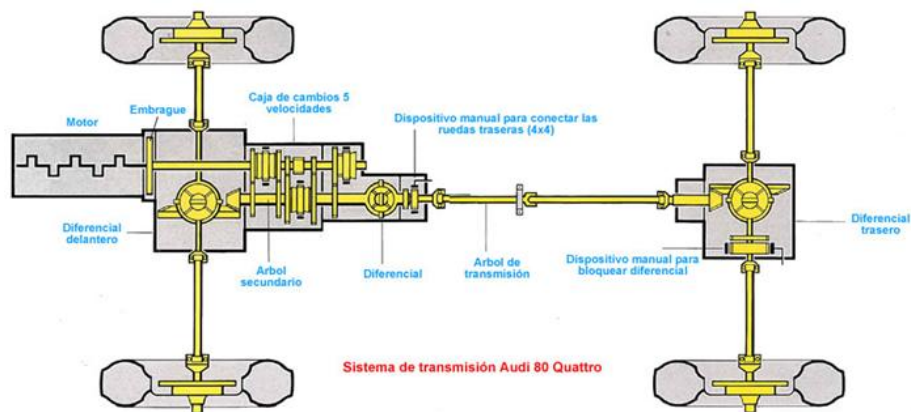


Figura 101. Esquema del sistema de transmisión de un vehículo. [32]

En resumen, se trata del sistema encargado de trasladar el movimiento del motor a las ruedas, teniendo por misión:

- Modificar la relación de transmisión entre el cigüeñal y las ruedas.
- Liberar el giro del cigüeñal del sistema de transmisión.
- Hacer que las ruedas puedan girar a distinta velocidad en las curvas o giros.

Existen múltiples sistemas de transmisión de movimiento mecánico. A continuación se explican brevemente los sistemas de transmisión por ruedas de fricción, por correa, por cadena y por junta universal. [33]

5.1. TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

5.1.1. TRANSMISIÓN MEDIANTE RUEDAS DE FRICCIÓN

La transmisión de movimiento mediante ruedas de fricción, figura 102, se realiza poniendo en contacto dos ruedas, de manera que una (motriz) arrastra a la otra (conducida) mediante la fuerza que produce el rozamiento entre ambas. Para poder transmitir el movimiento, las ruedas han de estar en contacto ejerciendo una cierta presión una sobre la otra. Así, al mover una de ellas arrastrará a la otra.

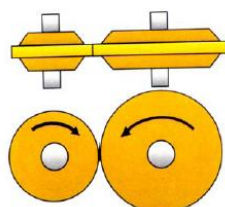


Figura 102. Sentido de giro de las ruedas de fricción.

El sentido de giro de la rueda conducida es contrario al sentido de giro de la rueda motriz. Por tanto, si queremos mantener el sentido de giro del motor tendremos que emplear un número impar de ruedas de fricción.

Las ruedas de fricción pueden ser cilíndricas, cónicas o esféricas. Esto permite transmitir el movimiento no sólo entre ejes paralelos, sino también entre ejes que se cortan o se cruzan en el espacio.

Las ruedas de fricción, figura 103, tienen el gran inconveniente de no poder transmitir grandes potencias, ya que puede resbalar una sobre otra, con la consiguiente pérdida de velocidad. Otro de los inconvenientes del uso de las ruedas de fricción es su desgaste, debido a que funcionan por rozamiento y presión.

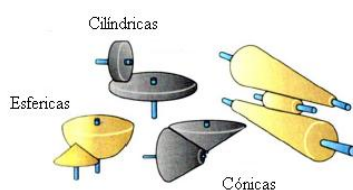


Figura 103. Diferentes tipos de ruedas de fricción.

5.1.2. TRANSMISIÓN POR CORREA

Los sistemas de transmisión por correa se emplean para transmitir la potencia y el movimiento, proporcionados por un elemento motor, entre dos ejes que se encuentran alejados uno del otro. Para ello se monta sobre cada uno de los ejes una polea y se enlazan ambas mediante una correa cerrada.

Existen diferentes tipos de correas para llevar a cabo la transmisión del movimiento. Estas correas se clasifican según la forma de su sección transversal, y pueden ser planas, redondas o trapeciales.

Las correas planas y las redondas cada vez se utilizan menos. Se podría decir que las correas planas están prácticamente en desuso, mientras que las trapeciales son las más utilizadas.

La mayor utilización de las correas trapeciales se debe a que presentan considerables ventajas sobre los otros tipos de correas. Las correas trapeciales, al tener su sección en forma de cuña tienden a clavarse en la acanaladura de la periferia de la polea en la que van colocadas, evitando que la correa se salga de dicha acanaladura. Además ejercen mayor presión sobre la polea, y así se evitan los resbalamientos de la correa sobre la polea, lo que produciría pérdidas de velocidad y fuerza.

Con las correas trapeciales se consigue una transmisión de movimiento más silenciosa y se reduce el riesgo de accidentes por rotura de correa, pues se fabrican de una sola pieza sin juntas ni uniones.

La transmisión por correa se emplea principalmente para transmitir movimiento entre ejes paralelos. Aunque también es posible transmitir movimiento entre ejes que no estén paralelos, se necesitarían disposiciones complicadas de poleas y correas para conseguir llevarlo a cabo. Además, este tipo de disposiciones suele conllevar pérdidas de velocidad y la posibilidad de que las correas se salgan de las poleas.

El principal inconveniente del sistema de transmisión por correa es que siempre existen pérdidas de velocidad por el resbalamiento de las correas, sobre todo en el momento de la puesta en marcha o del arranque de la máquina.

Para evitar las pérdidas de velocidad por resbalamiento entre la polea y la correa se utilizan correas dentadas montadas sobre poleas que, a su vez, también incorporan dientes tallados en su periferia. De esta manera, aumenta la sujeción entre la polea y la correa.

Si queremos evitar que las correas se salgan de las poleas, es necesario que las correas se mantengan tensadas. Para ello se emplean rodillos tensores, que ejercen sobre las correas la presión necesaria para mantenerlas en tensión.

5.1.3. TRANSMISIÓN POR CADENA

Los sistemas de transmisión por cadena se emplean para transmitir movimiento entre dos ejes que se encuentran alejados entre sí.

Para transmitir el movimiento entre dos ejes mediante una cadena, se montan unas ruedas dentadas sobre ambos ejes y se enlazan con una cadena que encaje en los dientes de las ruedas; de manera que, al girar una de ellas, arrastra a la otra.

Las cadenas están formadas por eslabones, una serie de elementos metálicos iguales y unidos entre sí.

Existen diferentes cadenas en función del tipo de eslabón de que están compuestas: cadenas de rodillos y cadenas articuladas.

- Las cadenas de rodillos están formadas por eslabones de chapa de acero unidos mediante ejes que llevan un rodillo giratorio. Éstos encajan perfectamente en los dientes de la rueda. Las cadenas de rodillos se emplean como medio de tracción en las bicicletas y otros mecanismos.
- Las cadenas articuladas están compuestas por eslabones especiales que encajan perfectamente en los dientes de la rueda, proporcionando un funcionamiento uniforme y silencioso (cadenas silenciosas).

La transmisión por cadena tiene la ventaja frente a la transmisión por correa o ruedas de fricción, de poder transmitir potencias mayores, puesto que la cadena va engarzada en los dientes de la rueda. Además, no existe el riesgo de perder velocidad por el resbalamiento de la cadena sobre rueda, porque los eslabones de la cadena quedan enganchados con los dientes de la rueda. Para evitar que la cadena se salga de las ruedas dentadas que arrastra es preciso mantener la tensión de la cadena mediante ruedas tensoras dentadas.

5.1.4. TRANSMISIÓN POR JUNTA UNIVERSAL

Este tipo de transmisión permite un desalineamiento angular que no se consigue con el resto de transmisiones.

Es muy resistente a los esfuerzos y su mantenimiento es mínimo, basta con engrasarlo para favorecer su funcionamiento.

En la figura 104 se representa esquemáticamente la transmisión por medio de junta universal de una motocicleta de 50 cc.

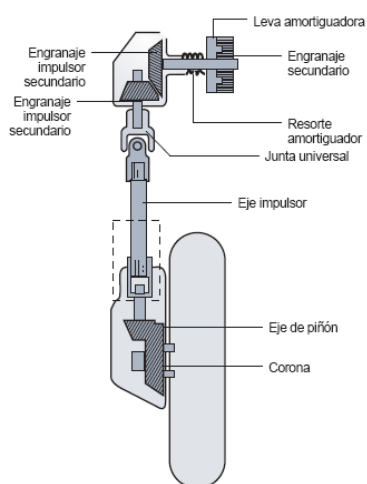


Figura 104. Sistema de transmisión de una motocicleta.

5.2. JUNTA UNIVERSAL

En este apartado se analizarán las partes de un sistema de transmisión por junta universal. La elección de este sistema de transmisión para su desarrollo teórico ha sido arbitraria.

5.2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

La transmisión por medio de junta está compuesta por los siguientes elementos:

- Embrague.
- Caja de cambio o caja de velocidades.

- Árbol de transmisión.
- Grupo cónico-diferencial.

Un ejemplo de disposición física de estos elementos se recoge en la figura 105.

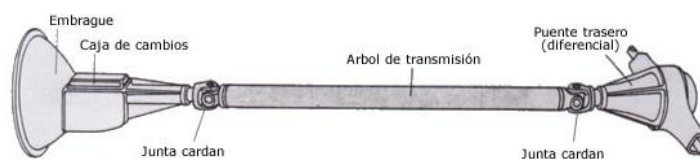


Figura 105. Sistema de transmisión de un vehículo. [32]

5.2.1.1. Embrague

Situado entre el motor y la caja de cambio, es el encargado de transmitir o interrumpir la transmisión de energía mecánica (par motor) del motor al sistema de transmisión.

Cuando no se pisa el pedal, los muelles aprietan el plato de presión contra el disco del embrague transmitiendo el movimiento al eje primario y, al pisarlo, se vence la resistencia de los muelles, liberando el disco de embrague (no se transmite el movimiento al eje primario).

En la figura 106 se representa esquemáticamente como es el funcionamiento del embrague cuando este está pisado (y transmite el movimiento) o no está pisado.

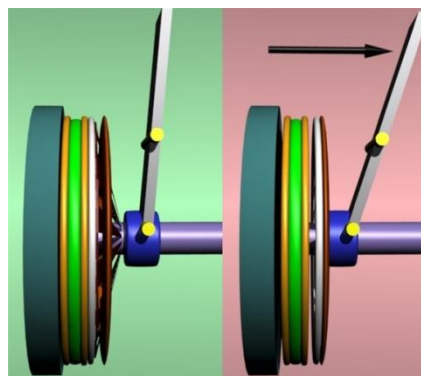


Figura 106. Esquema de la actuación de un embrague.



5.2.1.2. Caja de cambio o de velocidades

La caja de cambios es el elemento encargado de obtener en las ruedas el par motor suficiente para poner en movimiento desde parado y, una vez en marcha, obtener un par suficiente para poder vencer las resistencias de avance, fundamentalmente las resistencias aerodinámicas de rodadura y de pendiente.

La caja de cambio se utiliza para transmitir mayor o menor velocidad de giro al árbol de transmisión y, por él, a las ruedas, recibiendo el movimiento por el eje primario.

El eje intermediario transmite el movimiento al eje secundario cuando se selecciona una relación de marcha. Si el piñón del intermediario es pequeño y el del secundario es grande, la relación de marcha es corta. A la inversa, es larga.

La marcha directa une el eje primario y el secundario, y la quinta velocidad multiplica las revoluciones del eje primario.

La marcha atrás se consigue intercalando un piñón que invierte el sentido de giro del árbol de transmisión.

En la figura 107 se puede ver un ejemplo de actuación de la caja de cambios de un vehículo. El dibujo A muestra las partes de la caja de cambios, el resto de dibujos explica las combinaciones de ruedas que se deben hacer para obtener una u otra marcha y, por lo tanto, una u otra velocidad. El dibujo B corresponde a la primera marcha, el C, a la segunda y así sucesivamente hasta la cuarta marcha que se recoge en el dibujo E. En el dibujo F se representa la marcha atrás.

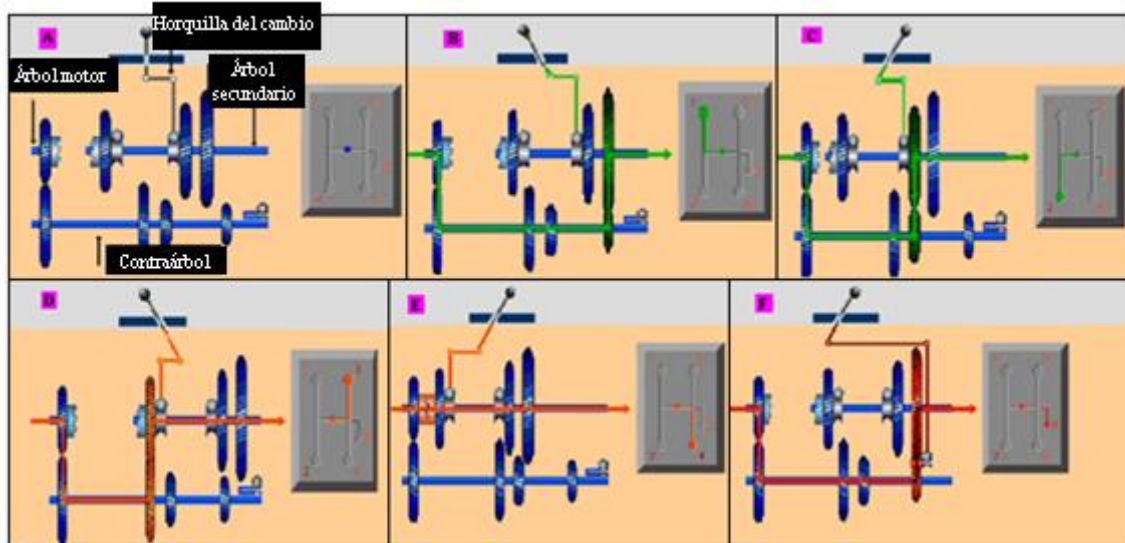


Figura 107. Disposición de las marchas en la caja de cambios.

Como el par motor se transmite a las ruedas y origina en ellas una fuerza de impulsión que vence la resistencia que se opone al movimiento, la potencia transmitida (W_f) debe ser igual, en todo momento, a la potencia absorbida en llanta, es decir [32]:

$$W_f = \frac{C_m * n}{716,2} = \frac{C_r * n_1}{716,2} \quad (5.1)$$

$$C_m * n = C_r * n_1 \quad (5.2)$$

siendo:

C_m , par desarrollado por el motor.

C_r , par resistente en las ruedas.

n , número de revoluciones en el motor.

n_1 , número de revoluciones en las ruedas.

Si no existiera la caja de cambios el número de revoluciones del motor (n) se transmitiría íntegramente a la ruedas ($n = n_1$), con lo cual el par a desarrollar por el motor (C_m) sería igual al par resistente en las ruedas (C_r).

Según esto si en algún momento el par resistente (C_r) aumentara, habría que aumentar igualmente la potencia del motor para mantener la igualdad $C_r = C_m$. En tal caso, se debería contar con un motor de una potencia exagerada, capaz de absorber en cualquier circunstancia los diferentes regímenes de carga que se originan en la ruedas durante un desplazamiento.

La caja de cambios, por tanto, se dispone en los vehículos para obtener, por medio de engranajes, el par motor necesario en las diferentes condiciones de marcha, aumentado el par de salida a cambio de reducir el número de revoluciones en las ruedas. Con la caja de cambios se logra mantener, dentro de unas condiciones óptimas, la potencia desarrollada por el motor.

Cálculo de la relación de transmisión (R_c):

Según la fórmula expresada anteriormente, los pares de transmisión son inversamente proporcionales al número de revoluciones:

$$\frac{C_r}{C_m} = \frac{n}{n_1} = R_c \quad (5.3)$$

Por tanto, la relación (n/n_1) es la desmultiplicación que hay que aplicar en la caja de cambios para obtener el aumento de par necesario en las ruedas, que está en función de los diámetros de las ruedas dentadas que engranan entre sí o del número de dientes de las mismas.

Cálculo de velocidades para una caja de cambios:

Para calcular las distintas relaciones de desmultiplicación que se deben acoplar en una caja de cambios, hay que establecer las mismas en función del par máximo transmitido por el motor, ya que dentro de este régimen es donde se obtiene la mayor fuerza de impulsión en las ruedas. Para ello, basta representar en un sistema de ejes coordenados las revoluciones máximas del motor, que están relacionadas directamente con la velocidad obtenida en las ruedas en función de su diámetro y la reducción efectuada en el puente.

Siendo " n " el número de revoluciones máximas del motor y " n_1 " el número de revoluciones al cual se obtiene el par de transmisión máximo del motor (par motor máximo), dentro de ese régimen deben establecerse las sucesivas desmultiplicaciones en la caja de cambios. Entre estos dos límites (n y n_1) se obtiene el régimen máximo y mínimo en cada desmultiplicación para un funcionamiento del motor a pleno rendimiento (figura 108).

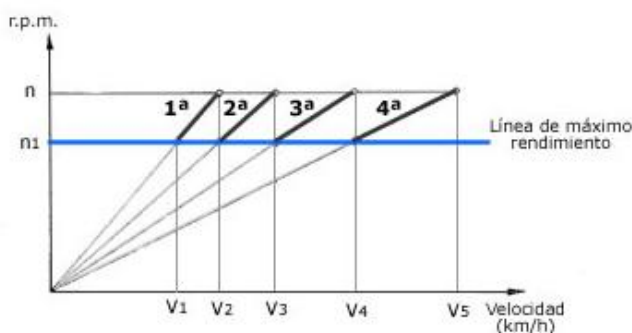


Figura 108. Cálculo de velocidades en la caja de cambios.

En la figura 109 se recoge un ejemplo del par y la velocidad que se obtiene para distintas formas de engranaje.

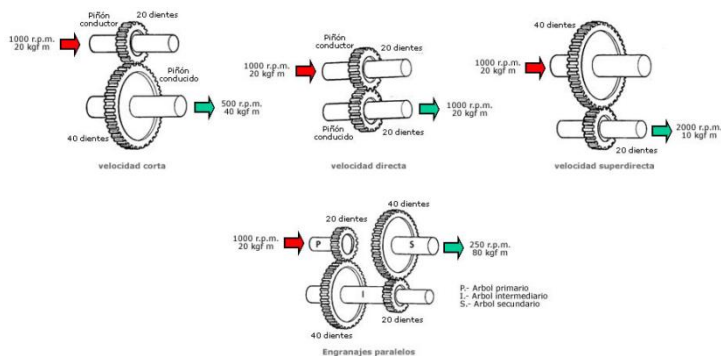


Figura 109. Ejemplos de transmisión de par y velocidad en una caja de cambios.

5.2.1.3. Árbol de transmisión

El árbol de transmisión es el encargado de transmitir la potencia desde la caja de cambios al elemento terminal (rueda).



Los elementos mecánicos más empleados para transmitir la fuerza y el movimiento a través de cadenas cinemáticas son: las ruedas de fricción, las transmisiones por correa, la transmisión por cadena y los engranajes, ya que normalmente el movimiento que se transmite es circular.

Todos estos elementos mecánicos pueden ir montados sobre los llamados ejes de transmisión o sobre árboles de transmisión.

Los ejes de transmisión son piezas cilíndricas, generalmente de corta longitud, que sirven de soporte a poleas, ruedas de fricción, etc. Pueden ser fijos o moverse en sentido giratorio, y no transmiten fuerza sino únicamente movimiento.

Los árboles de transmisión son piezas cilíndricas más o menos largas que trabajan a torsión y flexión, son siempre giratorios y transmiten potencia y movimiento. En la práctica se utiliza muchas veces la expresión ejes de transmisión para designar tanto a los árboles de transmisión como a los ejes de transmisión propiamente dichos.

En las cadenas cinemáticas se pueden encontrar también otros elementos o dispositivos de transmisión, como acoplamientos y soportes.

5.2.1.4. Grupo cónico-diferencial

Transforma el giro longitudinal del árbol de transmisión en giro transversal desmultiplicando constantemente el giro del eje.

5.2.2. MODOS DE REALIZAR LA TRANSMISIÓN

5.2.2.1. Transmisión simple

La transmisión simple (figura 110) consiste en transmitir el movimiento producido por el elemento motriz entre dos ejes o árboles.

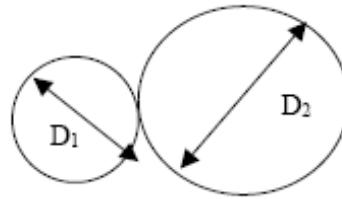


Figura 110. Esquema de un sistema de transmisión simple.

Si transmitimos movimiento entre dos árboles mediante ruedas de fricción, al desplazarse un punto P de la rueda 1 una vuelta completa, recorrerá una distancia L igual al perímetro de su circunferencia:

$$L = \pi * D_1 \quad (5.4)$$

De igual forma, un punto cualquiera de la rueda 2, al ser arrastrado, recorrerá la misma distancia L. Por tanto, si la rueda 1 gira un número de vueltas n_1 recorrerá un espacio E igual a:

$$E = n_1 * \pi * D_1 \quad (5.5)$$

Y la rueda 2 tendrá que recorrer el mismo espacio E, dando un número de vueltas n_2 , por lo que:

$$E = n_2 * \pi * D_2 \quad (5.6)$$

Sustituyendo:

$$n_1 * \pi * D_1 = n_2 * \pi * D_2 \quad (5.7)$$

O lo que es lo mismo:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\pi * D_2}{\pi * D_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (5.8)$$

Simplificando:

$$n_1 * D_1 = n_2 * D_2 \quad (5.9)$$

Esto también se puede aplicar a la transmisión por correa, por cadena y por engranajes, sustituyendo en las dos últimas el valor de los diámetros por el número de dientes (z_n) que corresponde a cada una de las ruedas.

5.2.2.2. Transmisión compuesta

Se llama transmisión compuesta a aquella que se realiza entre más de dos árboles o ejes de transmisión. En la figura 111 se puede ver un esquema de dicha transmisión.



Figura 111. Esquema de un sistema de transmisión compuesta.

Para conseguir elevar el efecto multiplicador o reductor de velocidad se emplean sistemas de transmisión compuesta utilizando mecanismos de transmisión por correas, cadenas, ruedas de fricción o engranajes.

Cuando se lleva a cabo la transmisión de movimiento entre más de dos ejes, en cada uno de los ejes intermedios irán montados obligatoriamente dos elementos de transmisión (ruedas de fricción, poleas, ruedas dentadas). Uno de ellos estará conectado al eje que le proporciona el movimiento; y el otro, al eje que arrastra.

5.3. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El concepto de eficiencia que tanto se ha manejado en este proyecto fin de carrera permite definirla, para el caso del sistema de transmisión, como el cociente entre la potencia transmitida a la rueda y la



potencia inyectada por el movimiento del embrague al contactar con el eje proveniente del motor eléctrico.

Para definir la eficiencia se hace necesario mencionar las pérdidas de energía que se produce en cada paso de la cadena.

La cadena de transmisión del movimiento comienza en el embrague, donde se encuentran las primeras pérdidas de energía por fricción en los discos.

A continuación nos encontramos con la caja de cambios, cuyas pérdidas se deben a las fuerzas que aparecen en los engranajes al contactar.

Más adelante nos podemos encontrar con varios elementos. Si se está utilizando la transmisión por cadena o por correa, se tendrán pérdidas por fricción, si se está usando una transmisión por junta universal, las pérdidas vendrán dadas por las características físicas del eje de transmisión tales como el peso, la longitud, el diámetro, etc.

Por último, en la cadena se tiene el grupo cónico-diferencial que provocará pérdidas por poseer un engranaje que interactúa con otro.

Si se contabilizan todas estas pérdidas, se podrá valorar la eficiencia del sistema.

5.3.1. CÁLCULO TEÓRICO DE EFICIENCIAS

En este apartado se explica teóricamente el concepto de fricción o rozamiento además de definir una serie de ecuaciones esenciales para el cálculo de las fuerzas que actúan en los cuerpos que sufren este fenómeno físico.

También se añade un apartado en el que se habla del cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en engranajes.

La existencia de estos factores a lo largo del sistema de transmisión impondrá las pérdidas de este punto de la cadena energética.



5.3.1.1. Pérdidas por fricción o rozamiento

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Se genera debido a las imperfecciones, especialmente microscópicas, entre las superficies en contacto. [34]

El roce estático es siempre menor o igual al coeficiente de rozamiento entre los dos objetos (número medido empíricamente y que se encuentra tabulado) multiplicado por la fuerza normal. El roce cinético, en cambio, es igual al coeficiente de rozamiento, denotado por la letra griega μ , por la normal en todo instante.

Si la fuerza de rozamiento F_r es proporcional a la normal N , y a la constante de proporcionalidad se la llama μ :

$$F_r = \mu * N \quad (5.10)$$

Y permaneciendo la fuerza normal constante, se puede calcular dos coeficientes de rozamiento: el estático y el dinámico:

$$\mu_e = \frac{F_e}{N} \quad (5.11)$$

$$\mu_d = \frac{F_d}{N} \quad (5.12)$$

donde el coeficiente de rozamiento estático μ_e corresponde al de la mayor fuerza que el cuerpo puede soportar antes de iniciar el movimiento y el coeficiente de rozamiento dinámico μ_d se refiere al de la fuerza necesaria para mantener el cuerpo en movimiento una vez iniciado.

5.3.1.1.1. *Rozamiento estático*

Es la fuerza que se opone al inicio del movimiento. Sobre un cuerpo en reposo al que se aplica una fuerza horizontal F , intervienen cuatro fuerzas (figura 112):

F : la fuerza aplicada.

F_r : la fuerza de rozamiento entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al movimiento.

P : el peso del propio cuerpo, igual a su masa por la aceleración de la gravedad.

N : la fuerza normal, con la que la superficie reacciona sobre el cuerpo sosteniéndolo.

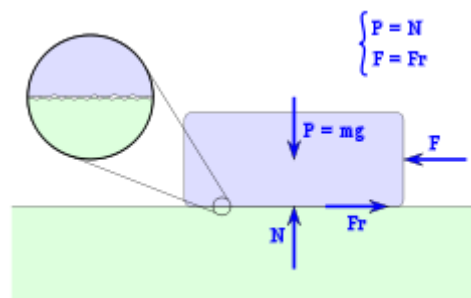


Figura 112. Conjuntos de fuerzas en el rozamiento estático.

Dado que el cuerpo está en reposo, la fuerza aplicada y la fuerza de rozamiento son iguales, y el peso del cuerpo y la normal también:

$$P = N \quad (5.13)$$

$$F = F_r \quad (5.14)$$

Se sabe que el peso del cuerpo P es el producto de su masa por la aceleración de la gravedad (g), y que la fuerza de rozamiento es el coeficiente estático por la normal:

$$P = N = m * g \quad (5.15)$$

$$F = F_r = \mu_e * N \quad (5.16)$$

esto es:

$$F = F_r = \mu_r * m * g \quad (5.17)$$

La fuerza horizontal F máxima que se puede aplicar a un cuerpo en reposo es igual al coeficiente de rozamiento estático por su masa y por la aceleración de la gravedad.

5.3.1.1.2. Rozamiento dinámico

Dado un cuerpo en movimiento sobre una superficie horizontal, deben considerarse las siguientes fuerzas, (figura 113):

F , es la fuerza aplicada.

F_r , es la fuerza de rozamiento entre la superficie de apoyo y el cuerpo, y que se opone al movimiento.

F_i , es la fuerza de inercia, que se opone a la aceleración de cuerpo, y que es igual a la masa del cuerpo m por la aceleración que sufre a .

P es el peso del propio cuerpo, igual a su masa por la aceleración de la gravedad.

N es la fuerza normal, que la superficie hace sobre el cuerpo sosteniéndolo.

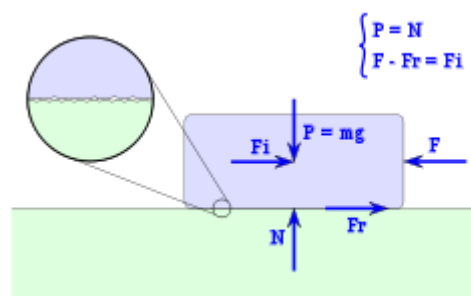


Figura 113. Conjuntos de fuerzas en el rozamiento dinámico.

Como equilibrio dinámico, se puede establecer que:



$$P = N \quad (5.18)$$

$$F - F_r = F_i \quad (5.19)$$

Sabiendo que:

$$P = N = m * g \quad (5.20)$$

$$F_r = \mu_d * N \quad (5.21)$$

$$F_i = m * a \quad (5.22)$$

se puede reescribir la segunda ecuación de equilibrio dinámico como:

$$F = (\mu_d * m * g) + (m * a) \quad (5.23)$$

Es decir, la fuerza resultante F aplicada a un cuerpo es igual a la fuerza de rozamiento F_r más la fuerza de inercia F_i que el cuerpo opone a ser acelerado. De lo que también se puede deducir:

$$F = m * (\mu_d * g + a) \quad (5.24)$$

$$\frac{F}{m} = (\mu_d * g) + a \quad (5.25)$$

$$\frac{F}{m} - (\mu_d * g) = a \quad (5.26)$$

Con lo que se tiene la aceleración (a) que sufre el cuerpo, al aplicarle una fuerza (F) mayor que la fuerza de rozamiento (F_r) con la superficie sobre la que se apoya.

5.3.1.2. Cálculo de la eficiencia de engranajes

Considérese el caso de la figura 114 donde una primera rueda motora (1) engrana con una segunda rueda conducida (2). Si consideramos la presencia de rozamiento, aparecerá una fuerza que se opone al deslizamiento relativo entre los dientes de ambas ruedas. [35]

Para estudiar ese deslizamiento relativo paramos la rueda (1) introduciendo en el sistema una velocidad angular de $-\omega_1$. En tal caso, la ω de la rueda (2) será: $\omega_r = \omega_1 + \omega_2$ (puesto que ω_1 y ω_2 eran de sentido opuestos al tratarse de engranajes exteriores). El punto de contacto, como perteneciente a la rueda (2), tenderá a ir hacia abajo, y la fuerza de rozamiento se opondrá a ese desplazamiento.

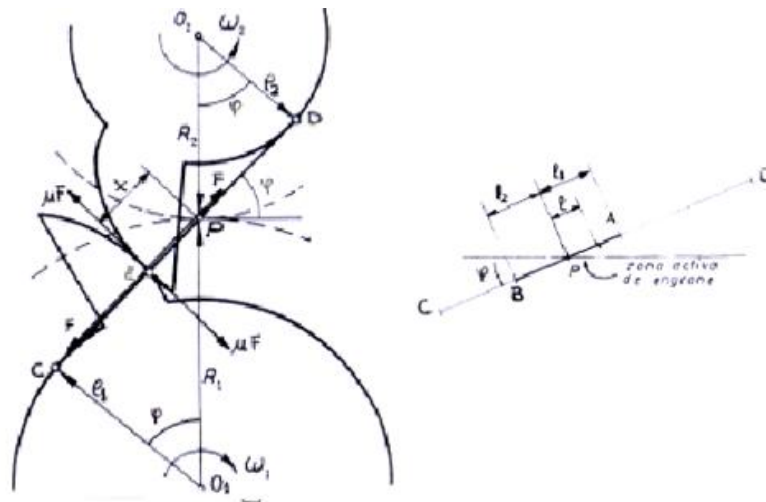


Figura 114. Fuerzas de contacto para calcular el rendimiento.

Aparecen así dos fuerzas iguales y de sentidos contrarios sobre cada uno de los dientes y de valor igual a $\mu * F$. Si se toma momentos con respecto a los centros de reducción de cada engranaje.



$$M_1 - F * R_1 * \cos \varphi + \mu * F(R_1 * \sin \varphi - x) = 0 \quad (5.27)$$

$$M_2 - F * R_2 * \cos \varphi + \mu * F(R_2 * \sin \varphi + x) = 0 \quad (5.28)$$

El rendimiento mecánico se define como:

$$\eta = \frac{\text{Potencia engranaje 2}}{\text{Potencia engranaje 1}} \quad (5.29)$$

Luego, el rendimiento en función del punto de contacto:

$$\eta = \frac{-M_2 * w_2}{M_1 * w_1} = \frac{M_2 * R_1}{M_1 * R_2} = \frac{\cos(\alpha + \varphi) - (\sin \alpha * \frac{x}{R_2})}{\cos(\alpha + \varphi) + (\sin \alpha * \frac{x}{R_1})} \quad (5.30)$$

Hay que tener en cuenta que $\mu = \tan \alpha$.

Para hallar el rendimiento medio, hay que reparar en el detalle de la figura 78, donde se muestra la zona activa y teniendo en cuenta que el punto P es el punto primitivo, se cumple:

$$ds = v_d * dt = (w_1 + w_2) * l * dt \quad (5.31)$$

Luego los ángulos que giran ambos engranajes son:

$$w_1 * dt = \frac{dl}{R_1 * \cos \varphi} \quad (5.32)$$



$$w_2 * dt = \frac{dl}{R_2 * \cos \varphi} \quad (5.33)$$

Reemplazando la ecuación 5.33 en la 5.32, se tiene:

$$ds = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{dl}{\cos \varphi} \quad (5.34)$$

la cual, integrado para ambos engranajes dará:

$$S = S_1 + S_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) * \frac{(l_1^2 + l_2^2)}{2 * \cos \varphi} \quad (5.35)$$

Ahora bien, el trabajo mecánico que hace el rozamiento y el trabajo aprovechable son:

$$W_{roz} = \mu * F * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{(l_1^2 + l_2^2)}{2 * \cos \varphi} \quad (5.36)$$

$$W_{aprovechable} = F * (l_1 + l_2) \quad (5.37)$$

Luego el rendimiento medio será:

$$\eta_{medio} = \frac{W_{aprovechable}}{W_{roz} + W_{aprovechable}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{2 * \cos \varphi} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{(l_1^2 + l_2^2)}{(l_1 + l_2)}} \quad (5.38)$$

Expresión que permite concluir que para que el rendimiento aumente se necesita:

- Minimizar el coeficiente de rozamiento (μ) entre las superficies de los dientes.
- Aumentar el radio (R_1 y R_2) de los cilindros primitivos de funcionamiento.
- Aumentar el $\cos \varphi$, es decir, disminuir el ángulo de presión φ .
- Minimizar las longitudes (l_1 y l_2) de los segmentos de aproximación y alejamiento.

5.3.2. EFICIENCIA DE CADA TRANSMISIÓN. FACTORES QUE INFLUYEN.

5.3.2.1. Transmisión por engranajes

Para calcular la eficiencia teórica de un sistema de transmisión por engranajes habría que sumar los efectos de las pérdidas de potencias producidas por fricción en el embrague con las pérdidas provocadas por la existencia de engranaje en el grupo cónico diferencial, la caja de cambios y la cadena añadiéndole una aportación de pérdidas por fricción en la cadena.

Los valores de eficiencias de este tipo de transmisión se encuentran entre el 81 y el 98,6%.

5.3.2.1.1. Factores que afectan a la eficiencia de las cadenas.

Según se vio en el apartado 5.3.1.2, para maximizar el rendimiento de un engranaje se debería minimizar el coeficiente de rozamiento entre las superficies de los dientes, aumentar el radio de los cilindros de funcionamiento, disminuir el ángulo de presión cadena-engranaje y minimizar las longitudes de los segmentos de aproximación y alejamiento.

Para maximizar el rendimiento de la cadena es importante tener en cuenta el material del que está construida (ya que juega un papel clave el coeficiente de rozamiento), el valor del tense de la cadena (ya que influye en el buen funcionamiento) y la lubricación.

En un artículo de una revista online de bicicletas, [36], exponen los resultados de un experimento realizado por ingenieros de la universidad Johns Hopkins a una bicicleta (principales consumidores de cadenas).



Estudiaron mediante cámaras infrarrojas una transmisión de bicicleta controlada por ordenador. Tras el ensayo los investigadores llegaron a la conclusión de que había dos factores que influían en la eficiencia de la transmisión: la lubricación y la curvatura que realiza la cadena mientras gira sobre el plato o el piñón.

Los ensayos con los efectos de la lubricación determinaron inicialmente que no afectaba a la eficiencia. El equipo de investigación compró tres productos utilizados para engrasar una cadena de bicicleta: un lubricante basado en cera, un aceite sintético y un lubricante en espray seco basado en litio. En las pruebas de laboratorio comparando estos tres productos no hubo ninguna diferencia significativa en cuanto a la eficiencia de energía. Después de las pruebas eliminaron los restos de lubricante de la cadena y volvieron a realizar el test, la sorpresa fue que la eficiencia era prácticamente la misma que cuando la cadena estaba lubricada. Los investigadores especularon que el lubricante no juega un papel importante en las condiciones ideales (y limpias) de un laboratorio en el que se emplea una cadena nueva, pero que podrían contribuir en mayor medida bajo condiciones reales. Su conclusión fue que el rol de los lubricantes es el de evitar que la suciedad penetre en la cadena. El lubricante es esencialmente una sustancia limpia que rellena los huecos críticos de la cadena, aquellos en que las piezas están muy juntas, evitando que entre la suciedad. En condiciones reales esta protección de la cadena puede evitar fricciones en la transmisión y por tanto pérdidas de energía.

En cuanto al radio de curvatura de la cadena respecto del plato o piñón la conclusión a la que llegaron fue que para mejorar la eficiencia en la transmisión lo que hay que tratar es de utilizar platos y piñones lo más grandes posibles para así reducir esa curvatura. En la práctica los platos ya son bastante grandes y existen pocas diferencias en cuanto al ángulo de la cadena entre un 34 y un 39 por ejemplo, o entre un 50 y un 53, por lo que donde realmente se puede reducir la pérdida de eficiencia es en los piñones, sobre todo en los más pequeños. Por ejemplo un 50-12 equivale prácticamente a un 53-13, por lo que en términos de eficiencia será preferible utilizar el 53-13 sobre el 50-12.

Los resultados de este ensayo, además de estar disponible en la web, fueron publicados en el Journal of Mechanical Design bajo el título “Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency”.

En la tabla 9 se muestra como varía la eficiencia en función de la multiplicación utilizada, la relación 52-15 se obtiene con una línea recta de cadena mientras que las combinaciones 52-11 y 52-21 implican un cierto cruce de la cadena utilizando el cambio.

	50 rpm	60 rpm	70 rpm	60 rpm	60 rpm
	100 W	100 W	100 W	150 W	175 W
52-11	92,5	91,1	88,7	94,6	95,5
52-15	94,7	92,3	90,4	96,2	97,5
52-21	95,2	93,8	92,0	92,0	98,2

Tabla 9. Eficiencias para distintas combinaciones de diámetros piñón-plato de la bicicleta.

La eficiencia medida es muy elevada, superior al 90% en la mayoría de los casos y en el orden del 97-98% a potencias razonables.

Los investigadores encontraron que la eficiencia de la transmisión está linealmente relacionada con el inverso de la tensión de la cadena (a mayor tensión de la cadena las pérdidas son menores) o, visto de una manera más intuitiva, las pérdidas están directamente relacionadas con la velocidad de la cadena (figura 115).

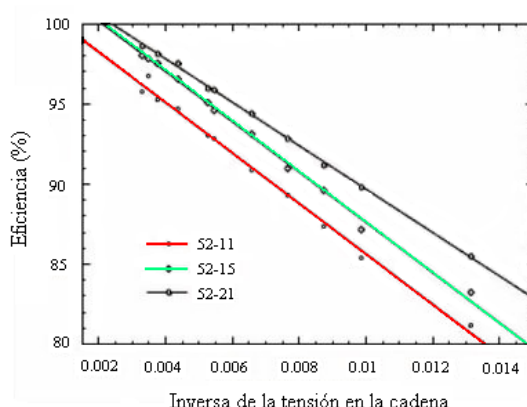


Figura 115. Relación entre la eficiencia y la tensión en la cadena.

Un aspecto interesante es la relación entre la eficiencia y la cantidad de dientes del piñón: el uso de piñones más grandes produce menos pérdidas de transmisión que los pequeños, relacionado con un menor movimiento angular de los eslabones de la cadena al seguir una circunferencia menos reducida.

Por ejemplo si tenemos la opción de rodar en 53-19 o 39-14 que producen el mismo desarrollo las pérdidas de transmisión serán menores en 53-19.

La eficiencia aumenta con el aumento de la potencia lo que hace pensar que las pérdidas de transmisión tienden a ser un valor relativamente constante y no una proporción fija de la potencia de pedaleo. [37]

5.3.2.2. Transmisión por correa

Existen múltiples tipos de correas en función de la forma. Así hay correas planas, correas trapezoidales y correas dentadas. Estas últimas son las más utilizadas debido a sus mejores prestaciones.

En las correas dentadas, el cálculo de la eficiencia es análogo al explicado en el apartado 4.3.2.1 para los engranajes ya que el comportamiento es similar. Además, hay que añadir los efectos de variación de longitud al aplicar fuerzas longitudinales en la correas.

Por lo tanto, al igual que ocurría en la transmisión por cadena, para calcular la eficiencia teórica de este sistema de transmisión habría que sumar los efectos de las pérdidas de potencias producidas por fricción en el embrague con las pérdidas provocadas por la existencia de engranaje en el grupo cónico diferencial, la caja de cambios y las correas y habrá que añadir una aportación de pérdidas por fricción en la correa.

Los valores de eficiencias de este tipo de transmisión se encuentran entre el 94-96 % para ruedas planas y trapezoidales y un 98% para ruedas dentadas.

Estos valores de eficiencias pueden ser obtenidos de los catálogos de fabricantes de sistemas de transmisión por correas como puede ser Siegling. [41]

5.3.2.2.1. Factores que afectan a la eficiencia de las correas.

En la eficiencia de las transmisión por correas influyen parámetros como el valor del tense de la correa, el diámetro, el ángulo de presión polea-correa, el material de la correa (ya que influye en la fuerza de rozamiento) y la existencia de dientes en su superficie (ya que mejorará la adherencia disminuyendo el deslizamiento).

Otro parámetro importante que influye en la eficiencia de la correa viene derivado por la característica del material del que está construida la correa. Es un material elástico que sufre deformaciones longitudinales por la existencia de fuerzas variables debido a su funcionamiento. Este fenómeno se llama deslizamiento funcional.

El deslizamiento funcional es provocado por las variaciones de longitud de la correa al pasar por las poleas, asociadas a las variaciones de fuerzas de tracción en los dos ramales.

Las fuerzas en los ramales, cuando la correa está parada o no hay par resistente, corresponden a la fuerza de tensado inicial F_0 (figura 116).

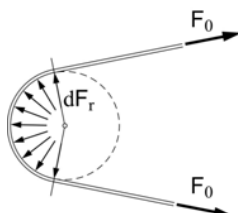


Figura 116. Fuerzas actuantes en la correa cuando está parado o no cargada.

Cuando hay par resistente T_2 y par motor T_1 y con la fuerza en el ramal descargado F_1 y la fuerza en el ramal cargado F_2 se tiene (figura 117):

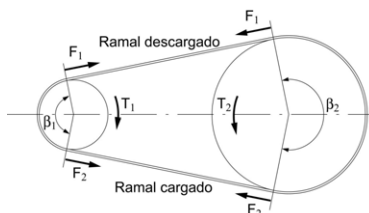


Figura 117. Fuerzas actuantes en la correa cuando está cargada.

Entonces, la fuerza tangencial útil será:

$$F_t = F_2 - F_1 \quad \text{con} \quad F_2 > F_1 \quad (5.39)$$

$$T_1 = F_t * d_1/2 \quad (5.40)$$

$$T_2 = F_t * d_2/2 \quad (5.41)$$

Un segmento de correa del ramal descargado entra en contacto con la polea conducida. Mientras recorre el ángulo θ_2 no desliza. Cuando recorre el ángulo γ se alarga ya que la fuerza tangencial pasa de F_1 a F_2 (aumenta) y, por lo tanto, desliza (figura 118).

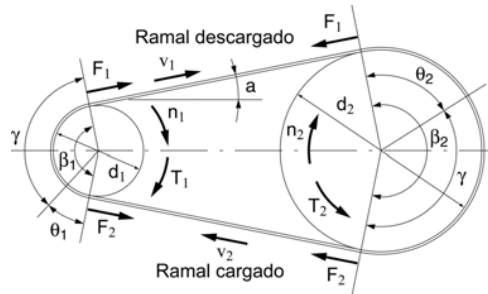


Figura 118. Sistema de fuerzas de una polea en movimiento.

El resultado es que la velocidad tangencial v_2 en el ramal cargado es superior a la velocidad tangencial v_1 en el ramal descargado.

$$v_2 > v_1 \quad \rightarrow \quad \psi = \frac{v_2 - v_1}{v_2} \approx 0,01 \div 0,02 \quad (5.42)$$

Con ψ deslizamiento funcional.

La relación de transmisión i (cociente entre la velocidad de la polea conductora y la polea conducida) se ve afectada:

$$w_1 = \frac{v_2}{d_1/2} \quad (5.43)$$

$$w_2 = \frac{v_1}{d_2/2} \quad (5.44)$$

$$i = \frac{w_1}{w_2} = \frac{v_2 \cdot d_2}{v_1 \cdot d_1} = \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{v_2}{v_2 \cdot (1-\psi)} = \frac{d_2}{d_1 \cdot (1-\psi)} \quad (5.45)$$

$$i = \frac{d_2}{d_1 \cdot (1-\psi)} \quad (5.46)$$

La relación entre el deslizamiento funcional y la eficiencia será:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2 \cdot w_2}{T_1 \cdot w_1} \quad (5.47)$$

Sustituyendo los valores de T y d anteriormente obtenidos tenemos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (5.48)$$

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{d_1}{d_2} \cdot (1 - \psi) \quad (5.49)$$

Por lo tanto:

$$\eta = \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{d_1 \cdot (1-\psi)}{d_2} = (1 - \psi) \quad (5.50)$$

El rendimiento es directamente proporcional al valor del deslizamiento funcional en el sistema de transmisión por correas.

5.3.2.3. Transmisión por junta universal

Cuando el sistema de transmisión que se utiliza es por junta universal hay que seguir contando, como en el caso de utilización de correas o de cadenas, con las pérdidas por la existencia de engranajes en la caja de cambio y el grupo cónico diferencial. A estas pérdidas hay que añadir las pérdidas por rozamiento en el embrague.

Además, y dado que se utilizan juntas tipo cardan y un eje de transmisión, hay que añadir las pérdidas provocadas por la fricción en las juntas, figura 119, y por esfuerzos en el eje.

El eje de transmisión es un eje circular que transmite el esfuerzo motriz proveniente de la junta cardan dispuesta a la salida de la caja de cambios hasta las ruedas motrices a través de otra junta cardan. Está sometido a sollicitaciones de torsión debido a la transmisión de un par de fuerzas y puede estar sometido a otros tipos de sollicitaciones mecánicas al mismo tiempo.

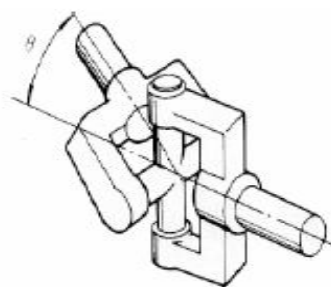


Figura 119. Detalle de junta cardan.

Para diseñar este eje hay que tener en cuenta tres parámetros fundamentales: su resistencia, su rigidez y su inercia de rotación.

- Resistencia: Debe ser lo suficientemente resistente como para soportar las tensiones mecánicas existentes.

- Rigidez: Sus características deben ser tales que soporten el estado de esfuerzos sin deformarse.
- Inercia: En el diseño de un eje de transmisión se ha de tener en cuenta que este no tenga demasiada inercia, pues la inercia supone una oposición a las variaciones de su velocidad angular, acumulando energía cinética y variando su momento angular.

$$T_e - T_s = I * \alpha \quad (5.51)$$

donde T_e es el par de entrada que se comunica al eje, T_s es el par de salida que el eje comunica al mecanismo conducido por él, I es la inercia y α es la aceleración angular.

5.3.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los vehículos generalmente utilizan tres tipos de transmisión. Estos sistemas de transmisión son por cadena, por correa y por junta universal.

Las partes comunes en todo sistema de transmisión son el embrague, la caja de cambios y el grupo cónico-diferencial. Entre la salida de la caja de cambios y la entrada del grupo cónico-diferencial se pueden encontrar varios dispositivos encargados de transmitir el movimiento generado en el motor hasta que llegue al elemento terminal, que será la rueda.

Algunos de estos dispositivos son el conjunto de cadenas y poleas, de correas y poleas o el eje de transmisión más las juntas cardan inicial y final.

Se puede definir el rendimiento de la cadena de transmisión como el cociente entre la potencia transmitida a la rueda (P_f) y la potencia inyectada (P_i) al inicio del sistema de transmisión, es decir, el embrague. La ecuación que evalúa la eficiencia será:

$$\eta(\%) = \frac{P_f}{P_i} * 100 \quad (5.52)$$

Para cuantificar la eficiencia de un sistema de transmisión hay que conocer los valores de las potencias antes mencionadas. La potencia de entrada al sistema será la de salida del motor eléctrico.

La potencia de salida del sistema de transmisión será la diferencia entre la potencia de entrada y las pérdidas de potencias que se producen en cada una de las partes que forman el sistema de transmisión.

Las pérdidas serán:

- En el embrague: Habrá pérdidas de potencia por rozamiento en los discos.
- En la caja de cambios: Se tendrán pérdidas por la existencia de engranajes, ya que, como se podía ver en la figura 109, las cajas de cambios están compuestas por diversos engranajes que interaccionan en función de la marcha elegida. Es en esa interacción donde se pierde energía.
- En el grupo cónico-diferencial: Habrá pérdidas por la existencia de engranajes de nuevo, ya que está compuesto por dos ruedas dentadas que engranan para transmitir el movimiento.
- Parte intermedia entre la caja de cambios y el grupo cónico-diferencial: Si está formado por cadenas o por correas, hay que cuantificar las pérdidas por engranajes ya que la cadena engrana con la polea en su movimiento y la correa, al estar dentada, también lo hace de forma similar. En cuanto al uso de las juntas y el eje de transmisión, hay que considerar pérdidas por rozamiento en dichas juntas y las pérdidas que se puedan producir en el eje al soportar los esfuerzos provocados por el movimiento de rotación.

Si se contabilizan todas estas pérdidas se podrá demostrar que, en los vehículos ligeros o que poseen tracción en dos ruedas, la eficiencia del sistema de transmisión está entre un 90 y un 95% mientras que en vehículos con tracción a las cuatro ruedas se obtienen valores teóricos entre un 85 y un 90%. [33]



6. PARTE V: RUEDA

En este apartado del proyecto, se va a estudiar la eficiencia del elemento final de la cadena energética considerada. Este elemento final es la rueda.

El estudio de eficiencia se va a realizar sin tener en cuenta las pérdidas de energía por efectos aerodinámicos ni por rozamientos estáticos o dinámicos, únicamente se va a centrar en analizar las pérdidas provocadas por los efectos de la resistencia a la rodadura que se explicará a continuación.

6.1. CONCEPTO DE RUEDA Y PARTES

Una rueda es el único elemento de enlace entre el vehículo y el suelo. Además, es un elemento de seguridad y confortabilidad.

La misión de la rueda y del neumático es soportar el peso del vehículo, transmitir la potencia del motor, dirigir el vehículo y ayudar a la estabilidad, confortabilidad y suspensión.

La rueda se divide en dos partes: la rueda metálica y el neumático. Hay que destacar la diferencia entre el concepto de rueda como el conjunto de todas las partes y el de rueda metálica como la parte interna de la rueda global.

Las partes de la rueda metálica, figura 120, son:

- Cámara: Lugar donde se aloja el aire.
- Aire
- Válvula: Dispositivo de entrada y salida del aire a la cámara
- Llanta: Elemento metálico sobre el cual se monta el neumático.

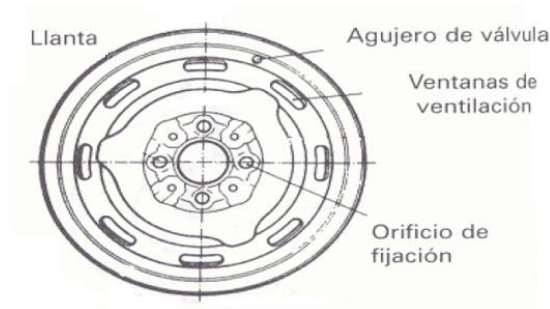


Figura 120. Partes de una rueda metálica.

Las partes del neumático, figura 121, son:

- Banda de rodadura: Es el elemento que contacta con el suelo y permite que la rueda tenga adherencia. Es resistente al desgaste y al choque y absorbe los ruidos.
- Talón: Es el encargado de anclar la cubierta a la llanta creando un cierre hermético. Asegura la transmisión de esfuerzos en frenadas y aceleraciones.
- Hombros: Unen los flancos con la banda de rodadura.
- Flancos: Es la parte lateral del neumático.
- Cordón de centrado: Facilita el posicionamiento de la cubierta en la llanta.
- Carcasa: Parte exterior del neumático, donde van montadas las bandas de rodadura.
- Calandraje o liner: Revestimiento de goma que sirve para unificar el neumático.

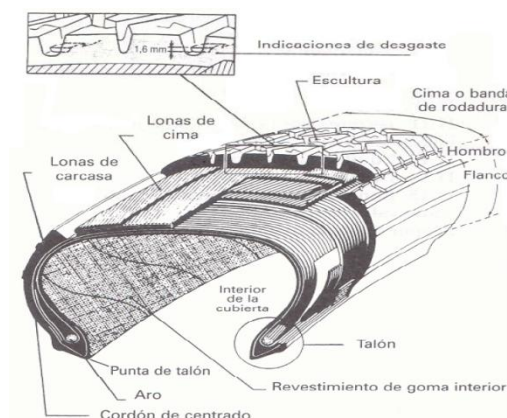


Figura 121. Partes del neumático.

6.2. TEORÍA SOBRE LA RODADURA

La rodadura implica que el cuerpo que rueda sobre una superficie lo hace sin resbalar o deslizarse con respecto a ésta, de modo que el punto o puntos del cuerpo que se hallan instantáneamente en contacto con la superficie se encuentran instantáneamente en reposo (velocidad nula con respecto a la superficie).

La rodadura o condición de "rodar" impone unas determinadas relaciones cinemáticas entre el movimiento lineal y el movimiento angular del móvil que rueda. La figura 122 muestra un cilindro que rueda sobre una superficie horizontal. Cuando el cilindro gira un cierto ángulo θ , el centro del mismo experimenta un desplazamiento x . La relación existente entre estas dos magnitudes es:

$$x = \theta * R \quad (6.1)$$

siendo R el radio del cilindro. A partir de esta relación encontramos fácilmente, por derivación respecto del tiempo, la relación existente entre la velocidad del centro del cilindro (v) y la velocidad angular (ω):

$$v = \omega * R \quad (6.2)$$

Una segunda derivación nos permite relacionar la aceleración del centro del cilindro (a) con la aceleración angular (α):

$$a = \alpha * R \quad (6.3)$$

La condición de rodadura significa que, en un instante cualquiera, los puntos del cilindro que están en contacto con la superficie se encuentran momentáneamente en reposo. Dichos puntos determinan el eje instantáneo de rotación pura del cilindro. Los demás puntos del cilindro tendrán en ese instante una cierta velocidad, perpendicular al eje instantáneo de rotación y a la línea que une

dicha partícula con dicho eje y de módulo proporcional a dicha distancia. Esto equivale a decir que el cilindro está girando en cada instante alrededor de la generatriz del cilindro que está en contacto con la superficie, con una cierta velocidad angular ω .

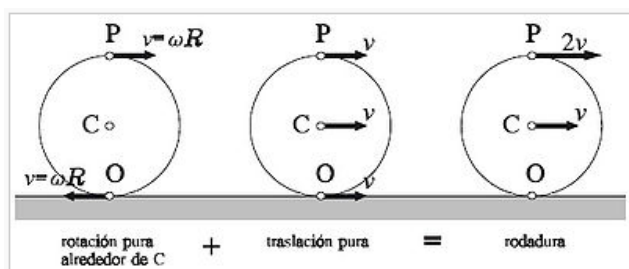


Figura 122. Condiciones de rodadura.

La resistencia a la rodadura se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o ambos. Como se verá, no tiene sentido alguno hablar de resistencia a la rodadura en el caso de un sólido rígido (indeformable) que rueda sobre una superficie rígida (indeformable).

El concepto de coeficiente de rodadura es similar al de coeficiente de rozamiento, con la diferencia de que este último hace alusión a dos superficies que deslizan o resbalan una sobre otra, mientras que en el coeficiente de rodadura no existe tal resbalamiento entre la rueda y la superficie sobre la que rueda, disminuyendo por regla general la resistencia al movimiento.

En las situaciones reales, los cuerpos se deforman, por poco que sea. El contacto no se realiza entonces a lo largo de una generatriz sino a lo largo de una estrecha banda $A'A''$, como se muestra en la figura 123. Ello da lugar a que aparezcan reacciones en los apoyos, reacciones que dan lugar a la aparición de un par que se opone a la rodadura. Con la finalidad de simplificar el problema, podemos imaginar que en cada instante el cilindro debe rotar sobre la generatriz que pasa por A'' para poder rodar superando el pequeño obstáculo que se opone a ello. Eso equivale a considerar desplazada la línea de acción de la reacción normal N una distancia que designaremos por μ_r , como se muestra en la figura 123. El par de resistencia a la rodadura y el par aplicado valen, respectivamente:

$$M_{res} = \mu_r * N \quad (6.4)$$

$$M_{apl} = R * F \quad (6.5)$$

En las condiciones críticas, cuando comienza la rodadura, el par aplicado o de arranque será mayor que el par resistente, de modo que:

$$M_{arranque} \geq M_{apl} \rightarrow R * F \geq \mu_r * N \quad (6.6)$$

Por lo que el cilindro comenzará a rodar si:

$$F \geq \frac{\mu_r * N}{R} = C_{rr} * N \quad (6.7)$$

que nos da el valor de la fuerza mínima necesaria para el arranque.

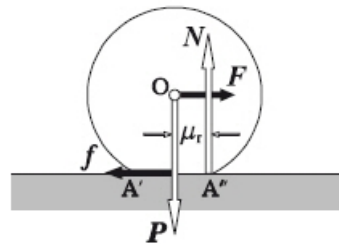


Figura 123. Fuerzas sobre una rueda.

La magnitud μ_r , que tiene dimensiones de una longitud, es el llamado coeficiente de resistencia a la rodadura. De las expresiones anteriores se deduce que el par de arranque es proporcional a la reacción normal N y que la fuerza de tracción necesaria para el arranque es inversamente proporcional al radio del cilindro; esa es la ventaja de las ruedas grandes sobre las pequeñas. El

valor del coeficiente μ_r depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto (fundamentalmente de su rigidez).

La magnitud adimensional $C_{rr} = \frac{\mu_r}{R}$ es el llamado coeficiente de rodadura.

En general, el coeficiente de rodadura tiene un valor muy inferior al de los coeficientes de rozamiento por deslizamiento (estático y cinético). Así pues, es mucho más conveniente, al efecto de disminuir las pérdidas energéticas, sustituir en los mecanismos y máquinas los deslizamientos por las rodaduras.

La dependencia del coeficiente de rodadura con el peso del sistema, a diferencia del coeficiente de rozamiento, hace que no sea siempre operativo calcular el coeficiente de rodadura a través del ángulo de rozamiento.

El valor del coeficiente de rodadura es característico de cada sistema, tal y como se puede ver en la tabla 10.

C_{rr}	Descripción
0,0002 a 0,001	Ruedas de ferrocarril sobre raíles de acero
0,0025	Neumáticos especiales Michelin para automóvil solar
0,005	Raíles estándar de tranvía
0,0055	Neumáticos BMX de bicicleta usados para automóvil solar
0,006 a 0,01	Neumáticos de automóvil de baja resistencia y neumáticos de camión sobre carretera lisa
0,010 a 0,015	Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hormigón
0,020	Neumáticos ordinarios de automóvil sobre losas de piedra
0,030 a 0,035	Neumáticos ordinarios de automóvil sobre alquitrán o asfalto

C_{rr}	Descripción
0,055 a 0,065	Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena
0,3	Neumáticos ordinarios de automóvil sobre hierba, barro y arena

Tabla 10. Cuadro de coeficientes de rodadura de varios tipos de ruedas. [38]

6.3. EFICIENCIA DE LA RUEDA

Para determinar la eficiencia de la rueda en la transmisión de la potencia proveniente del motor eléctrico, debemos estudiar la resistencia a la rodadura de las distintas partes que forman la rueda así como los parámetros que influyen en su valor.

Se puede definir la eficiencia de la rueda con la siguiente ecuación:

$$\eta(\%) = \frac{P_{rodadura}}{P_{sist.transmisión}} * 100 \quad (6.8)$$

siendo:

$P_{rodadura}$, las pérdidas producidas por rodadura en la rueda

$P_{sist. Transmisión}$, la potencia transmitida por el sistema de transmisión.

En los siguientes apartados se estudian por separado las distintas partes de una rueda a nivel de eficiencia para determinar más fácilmente cuales son los parámetros que le afectan.

6.3.1. EFICIENCIA DE LA RUEDA METÁLICA. PARÁMETROS QUE LE AFECTAN.

Para determinar la eficiencia de la rueda metálica hay que recurrir a la fórmula que definía el valor de la fuerza mínima necesaria para el arranque, ecuación 6.7. Este valor de fuerza mínima es el que define los parámetros que influyen en la eficiencia.

El concepto de eficiencia está relacionado con el concepto de resistencia a la rodadura y, éste, lo está con el concepto de fuerza mínima ya que a mayor resistencia de rodadura mayor será la fuerza mínima, mayores serán las pérdidas y, por lo tanto, menores serán las eficiencias obtenidas.

Por ello se puede decir que los parámetros que afectan a la eficiencia son:

- la rigidez o dureza de la rueda y superficie.
- el radio de la rueda (a mayor radio menor resistencia).
- el peso o carga al que se somete cada rueda.
- en el caso de ruedas neumáticas o hidráulicas, de su presión (a mayor presión menor resistencia).
- temperatura, el acabado de las superficies en contacto, velocidad relativa, etc.

6.3.2. EFICIENCIA DEL NEUMÁTICO. PARÁMETROS QUE LE AFECTAN.

Un neumático es más eficiente cuanto mejor transmite el movimiento desde el sistema de transmisión al suelo.

Para definir el valor de la eficiencia del neumático también habría que recurrir a la misma fórmula que en el caso de la eficiencia de la rueda metálica ya que la aportación es conjunta, por lo que todo lo explicado en el apartado 6.3.1 también es de aplicación en este.

Los parámetros que afectan a la eficiencia del neumático son:

- Las características físicas del neumático, tales como la anchura, el tipo, etc.
- La presión de inflado.

Estos parámetros influyen en el valor de la resistencia a la rodadura y, por lo tanto, también lo harán en la eficiencia. A continuación se explican brevemente la influencia de cada uno de ellos con ayuda de un artículo publicado en internet. [39]

6.3.2.1. Resistencia de rodadura en función de las características del neumático

Las características del neumático que afectan al valor de la resistencia de rodadura son el ancho del neumático, el tipo de neumático (tubular o clincher) y el material constructivo de la cámara (látex o butil).

6.3.2.1.1. Ancho del neumático

La resistencia a la rodadura de un neumático es el resultado de la disipación de energía en la flexión de materiales, un fenómeno también conocido como histéresis en el que el material cuando se expande no devuelve toda la energía que absorbe al contraerse.

En reposo, el neumático se deforma hasta que el área de contacto multiplicada por la presión del aire interior es equivalente al peso que soporta, si se incrementa el peso, o se disminuye la presión del neumático, el área de contacto se hará más grande y viceversa.

Cuando la rueda gira, en la parte delantera del área de contacto el neumático se está comprimiendo, mientras que en la parte trasera ocurre lo contrario: el neumático se expande y devuelve la fuerza de compresión a la superficie. La diferencia de fuerza ejercida entre los dos extremos del área de contacto es el resultado directo de la disipación de energía en la estructura.

Si sustituimos el conjunto de fuerzas ejercidas en ambas secciones del área de contacto (desde el eje hacia adelante y desde el eje hacia detrás) por dos fuerza equivalentes, vemos que la fuerza correspondiente a la porción delantera es mayor que la correspondiente a la porción trasera y que está desplazada por delante del eje, de la misma manera que la fuerza de la porción trasera está desplazada por detrás del eje.

Estas dos fuerzas desplazadas generan pares de torsión alrededor del eje: la parte trasera genera un par favorable al giro de la rueda, mientras la delantera genera un par mayor que se opone al giro de la rueda. La diferencia entre estos dos pares resulta en un par opuesto al giro de la rueda.

Este par resultante es lo que se denomina resistencia a la rodadura (figura 124).

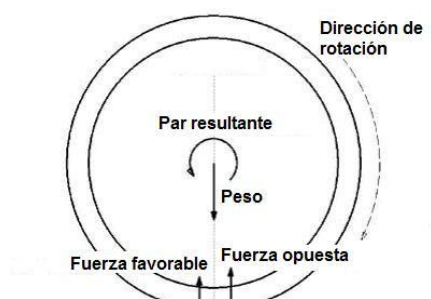


Figura 124. Influencia del ancho del neumático.

Dada una misma construcción del neumático y una misma presión de inflado un neumático más ancho tendrá una resistencia a la rodadura menor que uno angosto.

Esto es así porque el área de contacto viene determinada por la carga soportada por el neumático y la presión del aire dentro del mismo. Si estos dos factores son idénticos, un neumático más ancho tendrá un área de contacto más ancha, por lo tanto, para mantener el área de contacto idéntica a la del neumático más angosto, la longitud del área de contacto será menor. Al reducir la longitud, significa que los dos puntos de fuerza equivalentes de los que hablábamos anteriormente, estarán menos desplazados del eje, y por tanto el par aplicado por las fuerzas se reducirá [40].

En la siguiente figura, figura 125, puede apreciarse esta diferencia:

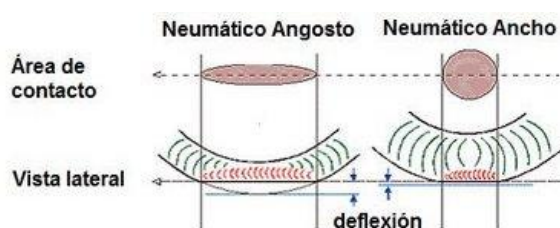


Figura 125. Diferentes áreas de contacto de neumáticos de distinto ancho.

6.3.2.1.2. Tipo de neumático

Para cuantificar la diferencia de rendimiento de un mismo tipo de neumático (tipo clincher) en función del fabricante, se realizó un ensayo en las instalaciones de Continental en Korbach, Alemania.

El ensayo consistió en hacer rodar los neumáticos bajo prueba sobre un rodillo de 120 cm de diámetro a 30km/h con una carga simulada correspondiente a un conjunto bicicleta + ciclista de 85kg, con una distribución de peso de 44% / 56% entre la rueda delantera y trasera respectivamente, y medir la potencia necesaria.

Los valores obtenidos corresponden a una superficie perfectamente lisa, una superficie rugosa provocará un incremento de estos valores. Debido a la naturaleza de la resistencia a la rodadura es esperable que la relación se mantenga al cambiar de superficie: a igual presión de inflado un neumático que es superior sobre una superficie lisa también lo será sobre una más rugosa.

Los resultados para los neumáticos tipo clincher se muestran en la siguiente figura (figura 126):

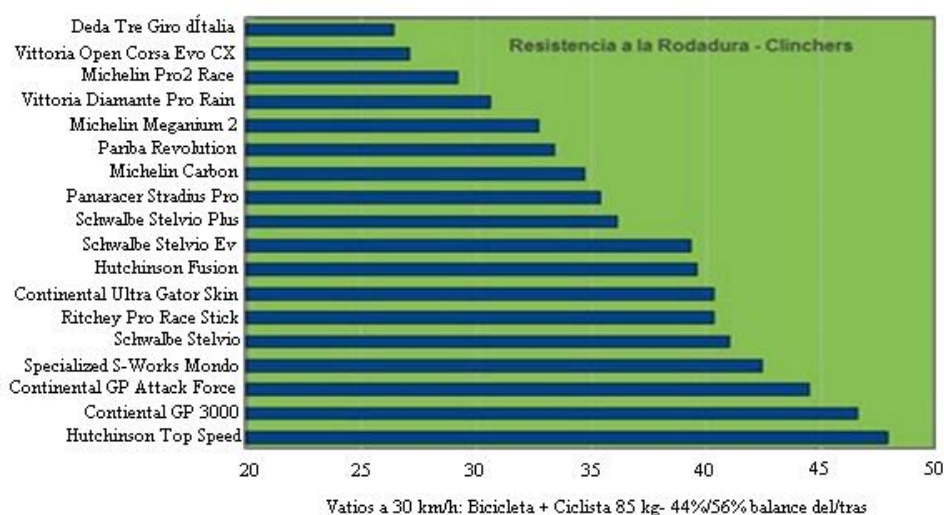


Figura 126. Potencia necesaria para rodar con distintos neumáticos tipo clincher. [39]

Se puede observar que la diferencia entre el mejor y el peor clincher es de 20 W a 30km/h, a velocidades más altas esta diferencia aumenta proporcionalmente. La elección de los neumáticos tiene considerable importancia en el rendimiento.

Una inspección de la tabla 11, correspondiente a los neumáticos de tipo tubular, muestra que la resistencia a la rodadura de los mejores tubulares es bastante peor a la de los mejores clincher.

C/T	Marca / Modelo	Crr	Watts 30km/h
C	Deda Tre Giro d'Italia	0.0038	26
C	Vittoria Open Corsa Evo CX	0.0039	27
C	Michelin Pro 2 Race	0.0042	29
C	Vittoria Diamante Pro Rain	0.0044	31
C	Michelin Megamium 2	0.0047	33
C	Pariba Revolution	0.0048	33
T	*Veloflex Carbon (Tubular)	0.0049	34
C	Michelin Carbon	0.0050	35
T	*Gommitalia Route du Nord (Tubular)	0.0050	35
C	Panaracer Stradius Pro	0.0051	35
C	Schwalbe Stelio Plus	0.0052	36
T	*Gommitalia Platinum (Tubular)	0.0053	37
T	*Vittoria Corsa Evo CX (Tubular)	0.0054	38
C	Schwalbe Stelio Evolution Front	0.0056	39
C	Continental GP Force (rear specific)	0.0057	40
C	Hutchinson Fusion	0.0057	40
C	Schwalbe Stelio Evolution Rear	0.0057	40
T	*Vittoria Corsa Evo KS (Tubular)	0.0057	40
C	Continental Ultra GatorSkin	0.0058	40
C	Ritchey Pro Race Slick WCS	0.0058	40
C	Schwalbe Stelio	0.0059	41
T	*Continental Competition (Tubular)	0.0059	41
T	*Veloflex Roubaix (Tubular)	0.0059	41
T	*Continental Podium (Tubular)	0.0060	42
C	Specialized S-Works Mondo	0.0061	42
C	Continental GP 3000	0.0067	47
C	Hutchinson Top Speed	0.0069	48
T	*Schwalbe Stelio (Tubular)	0.0069	48
C	Continental GP Attack (front specific)	0.0073	51
T	*Tufo Elite Jet (Tubular)	0.0073	51
T	*Schwalbe Montello 300 (Tubular)	0.0075	52
T	*Tufo Hi-Composite Carbon (Tubular)	0.0077	54

Tabla 11. Valores de C_{rr} para distintos neumáticos tipo tubular y clincher. [39]

Incluso versiones tubular y clincher del mismo modelo de neumático de alta calidad, con idénticas características constructivas, como los Vittoria Corsa Evo Cx (tubular) y Vittoria Open Corsa Evo Cx (clincher) exhiben diferencias del orden de los 10 vatios a favor de la versión clincher.

El ingeniero Al Morrison venía realizando pruebas similares sobre rodillos, con resultados compatibles a los anteriores, hasta que en 2007 descubrió que el problema estaba en la forma de pegar los tubulares a la llanta: la que usaba Continental provocaba un incremento muy importante de la resistencia a la rodadura. Reemplazando ese procedimiento por otro, los tubulares de alta calidad tienen resistencia a la rodadura igual o mejor que los clinchers de calidad comparable.

6.3.2.1.3. Material de la cámara

En este mismo artículo se realiza una comparación entre las cámaras construidas con látex o las de butil.

Las cámaras de látex ofrecen una apreciable reducción de la resistencia a la rodadura respecto a sus pares de butil, la razón es que se trata de un material más elástico, con menos pérdidas internas (histéresis).

6.3.2.2. Resistencia de rodadura en función de la presión de inflado

Las pruebas sobre rodillos anteriormente mencionadas también indicaban que la resistencia a la rodadura disminuye a medida que aumenta la presión de inflado pero, en la práctica, la experiencia indica que mayor presión no es necesariamente mejor.

El ingeniero Tom Anhalt realizó medidas del C_{rr} de bicicletas que tenían sus ruedas infladas a distintas presiones. Los resultados le permitieron construir el gráfico representado en la figura 127 en el que se puede ver que inicialmente el C_{rr} disminuye con el aumento de la presión de inflado hasta llegar a un valor óptimo (en este caso en alrededor de 115 psi, siendo la psi una unidad de presión equivalente a $0,07039 \text{ kg/cm}^2$) para luego aumentar muy rápidamente.

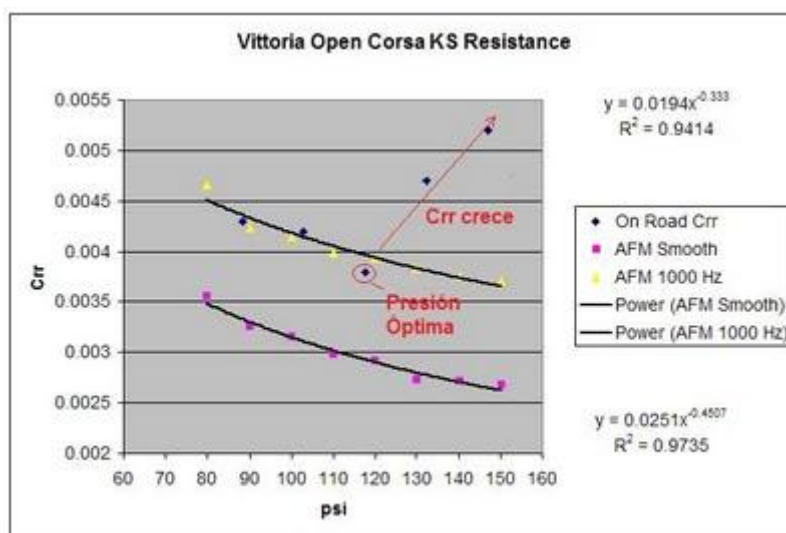


Figura 127. Medidas de los valores de C_{rr} a distintas presiones de inflado de las ruedas. [39]

La explicación es que, al ser los neumáticos una parte importante del sistema de suspensión de la bicicleta, llega un punto en que la presión es tan alta que dejan de cumplir esta función y las vibraciones que se transmiten al resto del sistema provocan una pérdida energética adicional. Esta pérdida se presenta como una resistencia a la rodadura incrementada para todo el sistema, aunque no se produzca en los neumáticos.

En particular es importante ver que la curva crece muy rápidamente cuando se supera la presión óptima indicando que, ante la duda, es preferible errar para el lado de una presión un poco inferior que superior.

6.3.3. RESUMEN Y CONCLUSIONES SOBRE LA EFICIENCIA

Para conocer la eficiencia de una rueda es necesario saber las pérdidas a las que se encuentra sometido el proceso de transformación de la potencia desde el motor eléctrico hasta el suelo en forma de movimiento.

Para cuantificar estas pérdidas de energía es imprescindible hablar de la resistencia a la rodadura, ya que es este fenómeno físico el que está presente. La existencia de la resistencia a la rodadura se da por dos motivos: por el hecho de que la rueda esté rodando por una superficie estática y por la presencia de deformaciones elásticas en el material en contacto con el suelo.

En este apartado sólo se ha considerado el sistema de forma aislada, sin influencia del medio exterior. Por ello sólo se tienen en cuenta las pérdidas por efecto de la rodadura y no las pérdidas aerodinámicas que podrían estar presentes al interaccionar con el medio.

Tampoco se consideran pérdidas por rozamiento con el suelo ya que este efecto se produce entre cuerpos que poseen movimiento independiente. Es cierto que muchos libros de física consideran la rodadura como un tipo de fricción pero en este documento se considera como un fenómeno completamente distinto.

Si se analizan los parámetros que afectan a la resistencia de rodadura de la rueda y, por lo tanto, a la eficiencia, se llegan a varias conclusiones:

1. Parámetros del proceso de movimiento como pueden ser el peso o carga al que se somete a la rueda, la temperatura del medio, la velocidad relativa, el radio de la rueda, etc. afectan a la eficiencia. También hay parámetros externos como la dureza de la superficie sobre la que rueda que afectaran al valor de las pérdidas.
2. Parámetros constructivos de la rueda, aunque para mayor precisión debería referirse a los parámetros constructivos del neumático, afectan de igual manera a las pérdidas por rodadura y, por extensión, a la eficiencia.

Estos parámetros son la anchura de los neumáticos, neumáticos más anchos (para una misma presión y materiales) tienden a producir una menor resistencia a la rodadura por menor deflexión, la presión de inflado, las altas presiones (hasta cierto punto) reducen la resistencia a la rodadura al disminuir la deflexión, los materiales de construcción de la carcasa del neumático, la utilización de materiales más finos en la carcasa de un neumático con mayor cantidad de hilos por pulgada generalmente se traduce en una menor resistencia a la rodadura debido a su mayor flexibilidad y menores pérdidas internas, el material con el que se fabrica la cámara del neumático, una cámara fabricada con materiales más flexibles (como el látex) tiene menos resistencia que otra fabricada con materiales con menos flexibles (como el butil) debido a sus menores pérdidas internas, y, por último, el material utilizado para disminuir la tendencia a pincharse del neumático también puede afectar a la eficiencia, los materiales empleados para aumentar la resistencia a las pinchaduras pueden aumentar la resistencia a la rodadura debido a la menor flexibilidad y mayores pérdidas internas.

7. CONCLUSIONES

Para poder definir la eficiencia de la cadena energética de cualquier vehículo es necesario estudiar las pérdidas de energía que se producen en cada punto de esta cadena. Para poder describir mejor estas pérdidas es bueno conocer los factores que afectan a la eficiencia, ya que así se podrá determinar una ecuación concreta que la cuantifique.

En el caso de la batería, la primera idea para cuantificar la eficiencia sería utilizar la Ley de Ohm. Esta ley nos indica que la potencia disipada en la batería es el producto de la resistencia interna de la misma, multiplicada por el cuadrado de la corriente que discurre por ella. Los valores que se obtienen de la aplicación de esta ecuación nada tienen que ver con la realidad ya que existen influencias de parámetros como la temperatura, los valores de tensiones y corrientes aplicadas y las potencias demandadas, que alejan los valores de eficiencia de los esperados.

Si por la batería circula mucha corriente aumentará el valor de la resistencia interna y se producirá mayor disipación de la energía en la misma, en forma de calor. Esto produce que el rendimiento o eficiencia disminuya.

Si utilizamos la batería con valores de tensión y corriente por encima de los valores nominales, la batería disipará más potencia también y, por lo tanto, la eficiencia disminuirá.

Para valores nominales de corriente en el circuito, el valor de resistencia interna coincide con el proporcionado por el fabricante y adopta un valor bajo (del orden de los miliohmios). En esta situación, la batería no disipa potencia y por lo tanto la eficiencia se sitúa en valores cercanos al 100%.

Cuando la batería sufre los efectos de la temperatura debido a un consumo alto de corriente y, por lo tanto, a una disipación de potencia alta, los valores de eficiencia disminuyen.

En el análisis de eficiencia del controlador se comprueba que lo que determina la eficiencia es el dispositivo electrónico que se utilice para realizar la conmutación. De este interruptor es importante conocer sus características de funcionamiento ya que fijaran los valores de pérdidas que se produzcan durante su operación.

Las pérdidas que se deben tener en cuenta son las pérdidas en conducción y las pérdidas en conmutación. Para ambas existen ecuaciones que permiten obtener un valor de estas y, por lo tanto, conocer la eficiencia.

De la ecuación de las pérdidas por conducción se puede deducir que, mientras mayor es la resistencia con la que se modela el comportamiento del interruptor utilizado, mayor la corriente que circula por el dispositivo durante la conducción y menor sea el ciclo de trabajo ($1-d$), o lo que es lo mismo, mayor sea el periodo de tiempo donde no conduce el dispositivo (d), mayor será la potencia perdida durante la conducción.

Las pérdidas por conmutación en el interruptor analizado dependen de la frecuencia de conmutación, a mayores frecuencias mayores serán las pérdidas, dependen del tiempo que invierta el interruptor en pasar de conducción a apagado y viceversa, a mayores tiempos de transición mayores serán las pérdidas, e influyen los valores de corriente y de tensiones máximas que soporta el dispositivo, a mayores tensiones y corrientes mayores pérdidas.

En el motor eléctrico también se hace necesario cuantificar las pérdidas que se producen durante su funcionamiento para poder fijar su eficiencia.

Las pérdidas que se van a tener en cuenta son las pérdidas constantes, como pueden ser las producidas en el núcleo o debidas a la fricción del sistema de ventilación, y también pérdidas variables en función de la carga, como las pérdidas en el cobre.

En el caso de los motores eléctricos existen numerosos ensayos que permiten situar las pérdidas entre un 75 y un 90%. Además, existe normativa para imponer la fabricación de máquinas cuya eficiencia energética sea alta, ya que de esto depende en gran medida la sostenibilidad energética y el consumo de energía responsable.

Para contabilizar la eficiencia en el caso del sistema de transmisión, hay que recurrir al concepto de pérdidas de energía en engranajes y pérdidas por rozamientos que se producen en los elementos mecánicos utilizados en la transmisión. Existen ecuaciones que permiten fijar el valor de estas pérdidas.

Por último, en el caso de la eficiencia de la rueda, hay que recurrir al concepto físico de la rodadura para poder cuantificar la energía que se pierde al transmitirse la potencia al pavimento sobre el que rueda.

En líneas generales se definirá la eficiencia como el cociente entre la energía que se obtiene a la salida de un sistema respecto a la energía que se dispuso en la entrada.

Para obtener la eficiencia total de la cadena estudiada, habrá que multiplicar las eficiencias de cada etapa.

De ahí que la eficiencia total sea, a la vista de la figura 128:

$$\eta_{TOTAL} = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 * \eta_5 \quad (7.1)$$

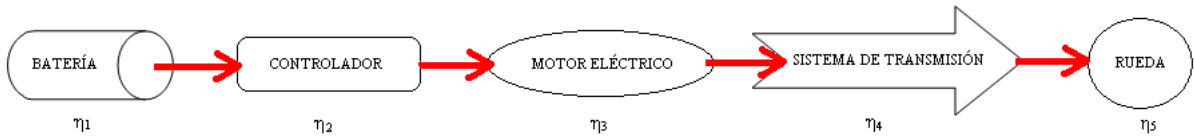


Figura 128. Cadena energética estudiada.

Definiendo cada uno de los valores de eficiencia como:

$$\eta_1(\%) = \frac{P_{salida\ de\ la\ batería}}{P_{entrada\ a\ la\ batería}} * 100 \quad (7.2)$$

$$\eta_2(\%) = \frac{P_{salida\ del\ controlador}}{P_{entrada\ al\ controlador}} * 100 \quad (7.3)$$

$$\eta_3(\%) = \frac{P_{salida\ del\ motor}}{P_{entrada\ al\ motor}} * 100 \quad (7.4)$$

$$\eta_4(\%) = \frac{P_{salida\ del\ sistema\ de\ transmisión}}{P_{entrada\ al\ sistema\ de\ transmisión}} * 100 \quad (7.5)$$

$$\eta_5(\%) = \frac{P_{\text{salida de la rueda}}}{P_{\text{entrada a la rueda}}} * 100 \quad (7.6)$$

A continuación se va a calcular la eficiencia de la cadena tanto en funcionamiento normal como en funcionamiento en las mejores condiciones del sistema.

Para un funcionamiento en las mejores condiciones posibles, esto es, la batería funcionando en un rango de corrientes y tensiones próximas a los valores nominales, el motor funcionando en el punto de operación óptimo y siendo este motor de categoría eficiente según directiva IEC, con la utilización de un controlador cuyas pérdidas no sean muy elevadas y con el sistema de transmisión y la rueda en buenas condiciones tenemos que, si se le dan valores a cada una de esas eficiencias, basándose en eficiencias teóricas proporcionadas por fabricantes, normativas o libros (como en el caso de motores eléctricos o controladores) o en eficiencias prácticas provenientes de ensayos en laboratorios (como en el caso de la batería), se tiene que el valor de eficiencia de la cadena es:

$$\eta_{TOTAL}(\%) = (0,96 * 0,99 * 0,90 * 0,85 * 0,90) * 100 = 65 \% \quad (7.7)$$

El rendimiento total de la cadena, desde la batería a la rueda, da un valor del 65%.

Para realizar este cálculo rápido se ha elegido un valor de rendimiento de la batería del 96%, que corresponde a una batería que está siendo usada con requerimientos idénticos a los nominales (este valor proviene de ensayos de la celda Enerland PQ5000-XP y proporciona una potencia menor de 3 W), un valor teórico del rendimiento del controlador del 99%, sin pérdidas perceptibles por conmutación o conducción del interruptor, con un 90% de eficiencia en el motor, siendo este valor un valor alto de los disponibles en el mercado (eficiencia IE3 según normativa), y con unos valores teóricos de eficiencias del sistema de transmisión y rueda del 85% y 90% respectivamente.

Se pierde el 35% de la energía inicial debido al paso por los distintos elementos de dicha cadena.



En el caso de funcionamiento normal, esto es, la batería funcionando a tensión y corriente distintos a sus valores nominales, el motor funcionando sobrecargado, el controlador disipando potencia en conducción y conmutación en condiciones cercanas al óptimo pero sin serlo, y con un sistema de transmisión y rueda en condiciones aceptables, se tiene que, aplicando la ecuación 7.1:

$$\eta_{TOTAL}(\%) = (0,75 * 0,8 * 0,85 * 0,85 * 0,85) * 100 = 37 \% \quad (7.8)$$

Se ha elegido un valor de rendimiento de la batería del 75% (que corresponde a la batería Enerland PQ5000-XP ensayada, suministrando una potencia de 12 W), mientras que en el controlador ha sido del 80%. La eficiencia del motor, del sistema de transmisión y de la rueda adquiere un valor del 85%. Con esta elección de rendimientos, la eficiencia de la cadena cae mucho, llegándose a disipar el 63% de la energía al pasar por todos los puntos de la cadena.

Con el estudio anterior se puede ver que, con el cambio de las condiciones de funcionamiento, la variación en la eficiencia total es grande. Es interesante hacer un estudio acerca de esta variación.

Para facilitar la discusión sobre este tema, las eficiencias del controlador, sistema de transmisión y rueda se van a mantener en los valores adoptados en el funcionamiento en las mejores condiciones, ya que no se poseen datos reales provenientes de ensayos prácticos. Así, el rendimiento del controlador, transmisión y rueda serán del 99%, 85% y 90% respectivamente.

Para poder fijar como se produce el cambio de eficiencias en las baterías, utilizaremos los ensayos de la batería Enerland PQ5000-XP cuyos resultados se recogen en el Anexo II. En la tabla 12 se representan los datos medios obtenidos de la Prueba en seco, para las tres celdas.

$\eta_{\text{medio}} (\%)$	$P_{\text{media}} (\text{W})$
98,67	1,42
96,33	2,97
91,00	5,73
76,00	12,19
55,33	20,83

Tabla 12. Rendimiento y potencias medias suministradas por la celda PQ5000-XP ensayada.

En esta tabla se puede ver que la batería, a medida que aumenta la potencia entregada al circuito, disminuye los valores de eficiencia. De ahí que, para potencias bajas (menores de 6 W) la eficiencia se mantenga en valores por encima del 90%, mientras que para altas potencias (desde los 6 W hasta los 20 W aproximadamente), el rendimiento medio caiga hasta el 55%.

En el caso de los motores, tal y como se veía en el apartado 4.3.5 de este proyecto, las variaciones de rendimientos dependen de la carga a la que se vea sometido.

En la tabla 13 se recogen los resultados de la eficiencia de un motor de 10 kW en función de la carga a la que debe hacer frente.

Carga (%)	Pérdidas totales (W)	Potencia de salida (W)	Potencia de entrada (W)	Eficiencia (%)
0	830	0	830	0
25	867	2500	3367	74
50	979	5000	5980	83,6
75	1165	7500	8665	86,5
100	1425	10000	11425	87,5
150	2169	15000	17170	83,4

Tabla 13. Variación de la eficiencia con la carga de un motor de 10 kW (IE1).

Este motor es de tipo estándar en cuanto a eficiencia. Para un funcionamiento a plena carga (carga del 100%), la eficiencia se sitúa en su valor máximo.

El objetivo final de este proyecto fin de carrera, además de cuantificar la eficiencia y de definir los factores que afectan a la misma, era aplicar este estudio a un caso real.



Este caso real es la motocicleta eléctrica construida en el laboratorio de mecánica de la universidad. Las características constructivas de esta motocicleta son las especificadas en los párrafos siguientes.

El controlador está basado en Mosfets [42]. De este interruptor no se poseen datos experimentales de eficiencia por lo que se supondrá una eficiencia media durante todo el funcionamiento de la motocicleta eléctrica del 90%. Su tensión nominal son 96 V mientras que la tensión y corriente máximas son, respectivamente, 135 V y 550 A.

El sistema de transmisión que se utiliza es por cadena. El valor de la eficiencia no varía con las condiciones de funcionamiento por lo que se puede tomar como constante y de un valor del 85%.

La rueda es otro elemento del que no se tiene datos de eficiencia, por lo que su valor a lo largo de todo el ciclo de funcionamiento será el obtenido al realizar el promedio entre el rendimiento a funcionamiento normal y en las mejores condiciones. El valor elegido será del 87%.

De las partes de las que si se poseen datos experimentales son de la batería y del motor eléctrico, por lo que sus valores de eficiencias se modificaran en función de la potencia que entreguen.

Los requerimientos de la misma son los siguientes:

- Batería Enerland PQ5000-XP (ver anexo 1):

$$V_N = 107,3 \text{ V.}$$

$$I_N = 51 \text{ Ah.}$$

$$\text{Energía mínima} = 4 \text{ kWh}$$

- Motor de inducción trifásico de jaula de ardilla. Modelo AC 20. [43]:

$$n_{\text{MAX}} = 7500 \text{ rpm.}$$

$$P = 36,75 \text{ kW.}$$

$$V_N = 96 \text{ V.}$$

Se han seleccionado los elementos anteriores al ser los que se encuentran disponibles en el laboratorio de mecánica.

Para el cálculo de la eficiencia de la cadena en función de la potencia requerida en el motor eléctrico (esto es, el porcentaje de carga que se necesita del motor), dado que este motor es de 36,75 kW y las eficiencias de controlador, sistema de transmisión y rueda permanecen constantes para todas las condiciones de funcionamiento debido a la falta de datos prácticos, se obtiene la tabla 14.

Carga del motor (%)	P salida motor (W)	η batería (%)	η motor (%)	η controlador (%)	η transmisión (%)	η rueda (%)	η total (%)
25	9187,5	98,67	77,00	90,00	85,00	87,00	50,57
50	18375	96,33	83,30	90,00	85,00	87,00	53,41
75	27562,5	91,00	88,50	90,00	85,00	87,00	53,60
100	36750	86,00	89,50	90,00	85,00	87,00	51,23
150	55125	55,33	83,20	90,00	85,00	87,00	30,64

Tabla 14. Rendimientos parciales y totales de la cadena energética para distintos puntos de funcionamiento.

Su representación gráfica se recoge en la figura 129:

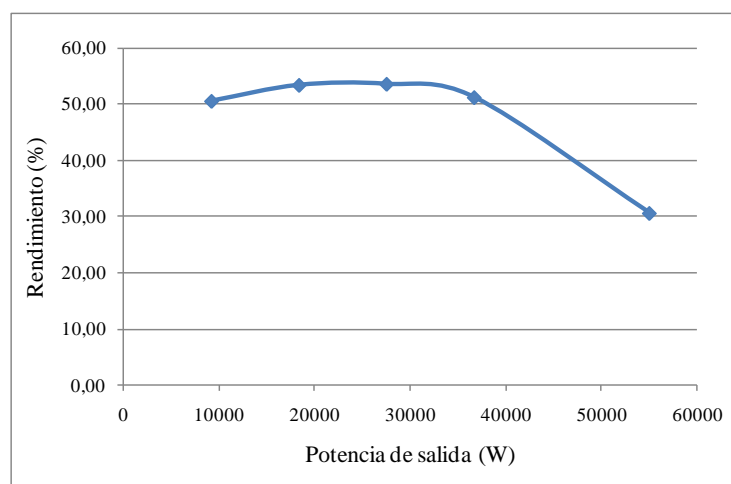


Figura 129. Rendimiento Vs Potencia de la cadena.

El motor, cuando funciona a potencias cercanas a su valor nominal, presenta un alto rendimiento. No es así cuando funciona sobrecargado o con muy baja carga.



La batería, a requerimientos de corrientes bajas, ofrece unos valores altos de rendimiento que disminuyen a medida que aumentan esas corrientes demandadas. De ahí que para bajas cargas del motor, las corrientes por la batería son cercanas a las nominales y se obtienen valores de eficiencias cercanos al 90%. Al aumentar la carga del motor y, por lo tanto, la demanda de corriente a la batería, su eficiencia disminuya hasta llegar a valores cercanos al 50%.

Cuando la sobrecarga del motor es alta (aproximadamente un 50%), la eficiencia del motor disminuye debido a un aumento en las pérdidas. Se necesita más corriente circulante por el sistema por lo que la eficiencia de la batería disminuye mucho.

De ahí que la eficiencia total de la cadena energética estudiada sea aceptable para valores próximos a la potencia nominal del motor teniendo un valor entre un 50 y un 60 %, mientras que para motores sobrecargados, la eficiencia disminuya hasta llegar a valores del 30%.



8. TRABAJOS FUTUROS

Con la finalización de este proyecto se plantean una serie de trabajos que, con posterioridad, podrían ser tratados con el fin de especificar con mayor detalle la eficiencia.

Estos trabajos no se incluyen en este proyecto debido a su gran extensión, pero se explican a continuación como recomendación:

- Los valores de eficiencias prácticas podrían ser medidos, por medio de ensayos en laboratorio, en elementos como los distintos sistemas de transmisión, los controladores, las ruedas, etc. ya que la información disponible sobre los mismos es escasa.
- Por medio de estas pruebas también se podrán determinar posibles factores que afecten a ese valor de eficiencia y que no han sido recogidos en el presente trabajo debido a que solo está basado en información teórica.
- El proyecto analizó una serie de elementos de cada punto de la cadena energética pero sería interesante añadir el estudio de otros como las pilas de combustible, los motores de alta eficiencia, etc. para determinar si los valores de eficiencia que ofrecen son mejores.

RECOMENDACIONES

- Para la selección de la batería se elegirán las basadas en la tecnología de litio, al ser estas más modernas y con mejores prestaciones en cuanto a ciclo de vida, tasa de carga/descarga, etc. Entre las baterías de ión litio o de polímero de litio, las diferencias en cuanto a densidad de energía por masa son apenas apreciables (la diferencia es de alrededor de 50 Wh/kg). La manipulación y uso de la batería Lipo se debe hacer en condiciones más estrictas que en las de tipo Li-ion pero su relación capacidad-potencia-peso las hace más interesantes.
- No se ha mencionado en ningún punto del proyecto pero sería necesario instalar un BMS (Battery Management System) en la batería para monitorear su estado de carga/descarga, el voltaje, la intensidad, la temperatura y el estado de salud de la misma. Así sería posible obtener un rendimiento más elevado.
- Los controladores recomendados para su uso son los MOSFET. Las pérdidas de potencia por conmutación son bajas y las frecuencias de conmutación, elevadas, por lo que se ajustan mejor a los requerimientos del motor que van a controlar y ofrecen una mejor eficiencia.
- Los motores eléctricos más adecuados y que se ajustan mejor al tipo de funcionamiento basado en ciclos continuos de arranque y parada son los motores asíncronos de inducción.

Los motores de corriente continua eran los más utilizados por la facilidad con la que se regulaba su posición, parada y velocidad. Pero estos motores eran menos eficientes y más caros que los motores de corriente alterna por lo que, en cuanto apareció la electrónica y se aplicó en el control de motores, el uso de los de alterna se extendió.

Al usarse de forma intermitente con ciclos de parada y arranque bruscos, es importante prestar especial atención en el mantenimiento.

- Para la elección de un sistema de transmisión es interesante centrarse en el criterio de complejidad. A lo largo del proyecto se han visto distintas transmisiones, todas ellas buscan el mismo objetivo final pero la transmisión por correa o por cadena es más sencilla que la transmisión por junta.



La elegida será la transmisión por cadena debido a sus mejores prestaciones: sencillez, menor desgaste, menor peso, etc. Lo que se traduce en la obtención de mayor eficiencia.

Hay que prestar especial atención a las condiciones de funcionamiento de la cadena para obtener las mejores cualidades, por ello es importante la limpieza y lubricación de la misma así como la supervisión del desgaste existente en los dientes, ya que a mayor suciedad y desgaste y menor lubricación, peor eficiencia ofrecerá.

- La elección del modelo y fabricante de la rueda se deja a criterio del lector. Es importante mencionar que se recomienda el mantenimiento del neumático en las condiciones óptimas ya que son éstas las que determinarán el alto rendimiento. Estas condiciones serán unos niveles de presión adecuada y un desgaste por debajo del límite máximo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.vehiculoselctricos.com/porque-electricos.php>. Consultado el 19/07/2010.
- [2] Artículo sobre el vehículo eléctrico. Periódico expansión de su edición del 17 de noviembre de 2010. Consultado el 12/02/2011.
- [3] <http://www.elpreciodelagasolina.com/gasolineras/madrid:34269>. Consultado el 17/02/2011.
- [4] <http://www.toyota.es/ebrochures/index.aspx?wt.cta=brochure>. Catálogo del Toyota iQ. Consultado 17/02/2011.
- [5] Artículo sobre el vehículo eléctrico. Periódico El Economista de la edición del 31 de Mayo de 2010.
- [6] http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_es.htm. Directiva europea sobre emisiones. Consultada el 11/09/2010.
- [7] José Fullea García. “Funcionamiento de una batería. Acumuladores Electroquímicos”. Editorial Mc Graw Hill.
- [8] Yuisbel Daniela Rojas Ríos. Proyecto fin de carrera “Requerimientos de refrigeración de una motocicleta eléctrica”. Año 2010. Universidad Simón Bolívar.
- [9] J. Larminie y J. Lowry. “Electric Vehicle Technology Explained.”. 1ra edición. Editorial John Wiley and Sons, 2003.
- [10] http://www.a123systems.com/cms/product/pdf/1/_ANR26650M1A.pdf. Manual de la batería A123. Consultado el 2 de julio de 2010.
- [11] http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_recargable. Documento electrónico sobre densidad de energía por masa y volumen de baterías consultado el 19/01/2011.
- [12] http://www.kokam.com/english/product/kokam_Lipo_01.html Página de Kokam, fabricante japonés de baterías, consultado el 13/02/2010.



- [13] <http://www.xatakamovil.com/varios/baterias-tipos-mitos-y-verdades-ii>. Fenómeno de pasivación en baterías consultado 19/01/2011.
- [14] <http://www.buchmann.ca/article25-page4-spanish.asp>. Artículo sobre la medida de la resistencia interna de una batería. Consultado el 14/02/2011.
- [15] Artículo publicado en Investigación y Ciencia (Ciencia y Empresa), Abril. 1996 sobre batería Li-ion.
- [16] <http://www.rcmaterial.com/pdfs/LipoManualES.pdf> Catálogo de batería tipo Lipo de RC, consultado el 23/08/2010.
- [17] Cristina Torrejón. Proyecto fin de carrera “Diseño de un pack de baterías para una motocicleta eléctrica”. Año 2010. Universidad Carlos III.
- [18] <http://www.enertechint.com/eng/product/01.asp> Catálogo de batería de Enertechint. Consultado el 23/08/2010.
- [19] Catálogo de baterías de EnergySystem. Consultado el 23/08/2010.
- [20] Incropera F., DeWitt D. “Fundamentos de transferencia de calor” (1999). Cuarta edición. Editorial Pearson.
- [21] Javier Sanz Feito. “Máquinas eléctricas”. Editorial Prentice Hall.
- [22] Apuntes de la asignatura de “Accionamientos eléctricos regulados”. 5º curso de Ingeniería Industrial.
- [23] Muhammad H Rashid. “Electrónica de potencia”. Editorial Prentice Hall.
- [24] M. Cortés, J. Corrales y A. Enseñal. “Teoría general de máquinas eléctricas”. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [25] L. Esquiroz, C. Alvarez. J.A. Martínez y J. C. Alvarez. “Electrónica de potencia: dispositivos”. Editorial Universidad de Oviedo (servicio de publicaciones).
- [26] Apuntes de la asignatura de “Electrónica II”. 4º curso de Ingeniería Industrial.



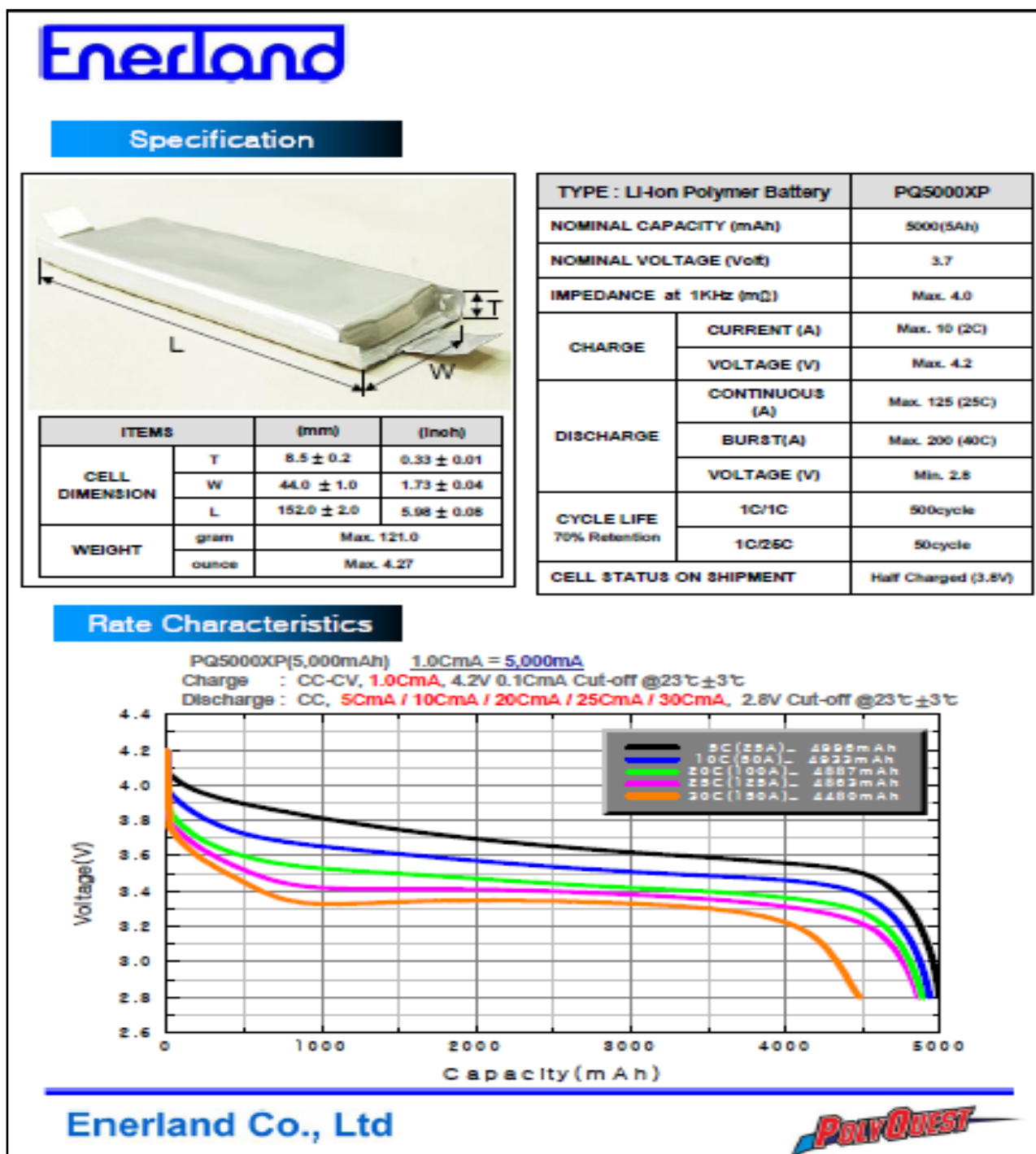
- [27] <http://gsep.uc3m.es>. Web del departamento de electrónica de la universidad Carlos III. Consultada el 8/03/2011.
- [28] Enríquez Harper. “El abc de las máquinas eléctricas II. Motores de corriente alterna”. Editorial Limusa.
- [29] Enríquez Harper. “Curso de transformadores y motores de inducción”. Cuarta Edición. Editorial Limusa.
- [30] Noelia Álvarez Fernández. Extracto del Proyecto fin de carrera. “Análisis de diferentes procedimientos y ensayos para la determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos”.
- [31] www.abb.com. Web del fabricante de motores ABB. Consultada el 23/03/2011.
- [32] www.mecanicavirtual.org. Página web de teoría sobre mecánica. Consultada el 13/03/2011.
- [33] J. Ferrer y E. J. Domínguez. “Sistemas de transmisión y frenado”. Editorial Editex.
- [34] A. Vidaurre, M. H. Jiménez y J. Riera. “Fundamentos físicos de la ingeniería”. Universidad Politécnica de Valencia.
- [35] www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/elementosdemaquinas/cap09-02.pdf. Documento sobre el cálculo de engranajes. Consultado el 25/03/2011.
- [36] www.arueda.com/tech/reportajes/cuestion-de-eficiencia.html. Revista online de bicicletas. Consultada el 26/03/2011.
- [37] www.amtriathlon.com/2009/07/eficiencia-de-la-transmision-de-la-bici.html. Web sobre bicicletas. Consultada el 27/03/2011.
- [38] http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_a_la_rodadura. Web consultada el 27/03/2011.
- [39] <http://www.amtriathlon.com/2009/07/resistencia-la-rodadura.html>. Web sobre bicicletas consultada el 27/03/2011.
- [40] <http://www.definicionde.com/perdida-por-rodadura>. Web consultada el 30 /03/2011.
- [41] <http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/correa/siegling.1.pdf>. Catálogo de correas de transmisión de Siegling. Consultada el 15/03/2011.



[42] <http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=cProducts.dspProductCategory&catID=8>. Web del fabricante del controlador, modelo 1238. Consultado el 14/07/2010.

[43] http://www.electricmotorsport.com/store/ems_ev_parts_motors_ac-induction.php. Página web del fabricante del motor, modelo AC 20. Consultada el 24/04/2010.

ANEXO I. Hoja de características de la celda Enerland PQ5000-XP.





ANEXO II. Resumen teórico y tablas de resultados del PFC de Yuisbel Rojas.

Desarrollo de los ensayos prácticos:

- 1) En la primera prueba se ensayaron tres celdas de polímero de litio distintas de la marca Enerland y de modelo PQ5000XP, por medio de lo que se denominó “Prueba en seco”. El objetivo era obtener el valor de la eficiencia de la batería a partir de su valor de resistencia interna.

En el proyecto se midió la resistencia interna de la batería conectándole una resistencia externa de carga, alimentando el circuito y midiendo la corriente que circulaba por la resistencia de carga. Si se tiene el valor de corriente que circula y el valor de la carga, se puede fijar el valor de la resistencia interna aplicando la ecuación:

$$R_i = (V/I) - R_c$$

Con esta medida de corriente también se puede obtener el valor de la potencia generada por la batería.

$$\text{Potencia [W]} = \text{Tensión [V]} * \text{Corriente [A]}$$

Los valores de las resistencias de carga utilizadas fueron 10.1Ω , 4.7Ω , 2.3Ω , 0.9Ω , 0.4Ω y 0.1Ω .

- 2) En la segunda prueba se ensayaron las mismas tres celdas por medio de la “Prueba con el Calorímetro”. El objetivo fue obtener el valor de la eficiencia de la batería por medio del valor de potencia disipada por la celda.

Para obtener la potencia que disipa la batería se tenía que medir el calor que generaba. Para ello se midió la temperatura de la celda en diversos periodos de tiempo y se aplicó el concepto de energía.

La energía es la capacidad que tiene un cuerpo de realizar algún trabajo. Desde un punto de vista termodinámico, se puede medir la energía (el calor) que libera un cuerpo a un



determinado ambiente, como producto de una reacción química. Para ello es necesario conocer las condiciones del entorno en el cual se encuentra dicho cuerpo, tal como se indica en la siguiente expresión matemática:

$$E = \Delta T \rho * C_p * Vol$$

donde:

E = Es la energía que se libera al fluido en forma de calor [J].

ΔT : Es la diferencia de temperaturas de T_f (temperatura a la cual se encuentra el fluido) y T_a (temperatura ambiente) [$^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{K}$].

ρ : La densidad del fluido medida a T_f [Kg/m^3].

C_p : Capacidad calorífica específica a presión constante (en este caso presión atmosférica a 1 atm) [$\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$].

Vol.: Volumen del fluido [m^3].

A partir del concepto de energía, se puede definir la potencia disipada como la cantidad de energía que libera o entrega un cuerpo en un determinado tiempo. La siguiente fórmula demuestra esta relación de potencia:

$$P_{dis} [\text{W}] = E [\text{J}] / t [\text{s}]$$

También se midió la potencia de entrada a la celda, por lo que se podía obtener fácilmente la eficiencia de la batería.

Resultados:

➤ Pruebas en seco

Rex (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Rin (Ω)	η (%)	Pot (W)
10,1	3,788	0,37	0,1	99	1,40
4,7	3,780	0,78	0,1	97	2,95
2,3	3,780	5,63	0,2	91	5,67



Rex (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Rin (Ω)	η (%)	Pot (W)
0,9	3,790	3,26	0,3	78	12,36
0,4	3,780	5,63	0,3	60	21,28

Tabla 2A. Cálculos de la celda 1.

Rex (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Rin (Ω)	η (%)	Pot (W)
10,1	3,820	0,38	0,2	99	1,45
4,7	3,837	0,78	0,2	96	2,99
2,3	3,837	1,51	0,2	91	5,79
0,9	3,820	3,18	0,3	75	12,15
0,4	3,833	5,45	0,4	50	20,89

Tabla 3A. Cálculos de la celda 2.

Rex (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Rin (Ω)	η (%)	Pot (W)
10,1	3,800	0,37	0,2	98	1,41
4,7	3,814	0,78	0,2	96	2,97
2,3	3,800	1,51	0,2	91	5,74
0,9	3,800	3,17	0,3	75	12,05
0,4	3,800	5,35	0,3	56	20,33

Tabla 4A. Cálculos de la celda 3.

**Pruebas con el calorímetro**1ª Prueba:

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	30,7	0	0	100
300	30,7	0	0	100
600	30,7	0	0	100
900	30,7	0	0	100
1200	30,7	0	0	100
1500	30,7	0	0	100
1800	30,7	0	0	100
2100	30,7	0	0	100
2400	30,7	0	0	100
2700	30,7	0	0	100
3000	30,7	0	0	100
3300	30,7	0	0	100
3600	30,7	0	0	100

Tabla 5A. Datos celda 1. $R_c = 10.1 \Omega$, $V = 3.92 \text{ V}$, $I = 0.39 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 30.7 \text{ °C}$, $P = 1.53 \text{ W}$

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,1	0	0	100
300	29,1	0	0	100



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
600	29,1	0	0	100
900	29,1	0	0	100
1200	29,1	0	0	100
1500	29,1	0	0	100
1800	29,1	0	0	100
2100	29,1	0	0	100
2400	29,1	0	0	100
2700	29,1	0	0	100
3000	29,1	0	0	100
3300	29,1	0	0	100
3600	29,1	0	0	100

Tabla 6A. Datos celda 2. $R_c = 10.1 \, \Omega$, $V = 4.02 \, V$, $I = 0.39 \, A$, $T_{amb} = 29.1 \, ^\circ C$, $P = 1.57 \, W$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,2 ± 0,1	0	0	100
300	29,2 ± 0,1	0	0	100
600	29,2 ± 0,1	0	0	100
900	29,2 ± 0,1	0	0	100
1200	29,2 ± 0,1	0	0	100
1500	29,2 ± 0,1	0	0	100



tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
1800	29,2 ± 0,1	0	0	100
2100	29,2 ± 0,1	0	0	100
2400	29,2 ± 0,1	0	0	100
2700	29,2 ± 0,1	0	0	100
3000	29,2 ± 0,1	0	0	100
3300	29,3 ± 0,1	276	0	95
3600	29,4 ± 0,1	553	0	91

Tabla 7A. Datos celda 3. $R_c = 10.1 \, \Omega$, $V = 4.19 \, V$, $I = 0.41 \, A$, $T_{amb} = 29.2 \, ^\circ C$, $P = 1.72 \, W$.2º Prueba

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	30,7	0	0	100
300	30,7	0	0	100
600	30,7	0	0	100
900	30,7	0	0	100
1200	30,8	277	0,2	92
1500	30,8	277	0,2	93
1800	30,8	277	0,2	95
2100	30,8	277	0,1	95
2400	30,9	555	0,2	92



tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
2700	30,9	555	0,2	93
3000	30,9	555	0,2	93
3300	31,0	832	0,3	91
3600	31,0	832	0,2	92

Tabla 8A. Datos celda 1. $R_c = 4.7 \Omega$, $V = 3.71 \text{ V}$, $I = 0.76 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 30.7 \text{ °C}$, $P = 2.82 \text{ W}$.

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	28,9	0	0	100
300	28,9	0	0	100
600	28,9	0	0	100
900	28,9	0	0	100
1200	29,0	276	0	94
1500	29,0	276	0	95
1800	29,0	276	0	96
2100	29,0	276	0	96
2400	29,1	553	0	94
2700	29,1	553	0	94
3000	29,1	553	0	95
3300	29,1	553	0	95
3600	29,1	553	0	96



Tabla 9A. Datos celda 2. $R_c = 4.7 \, \Omega$, $V = 4.19 \, \text{V}$, $I = 0.85 \, \text{A}$, $T_{\text{amb}} = 28.9 \, ^\circ\text{C}$, $P = 3.56 \, \text{W}$.

tiempo (s)	$T_g \, (^\circ\text{C})$	E (J)	Q (W)	$\eta \, (\%)$
0	29,3	0	0	100
300	29,3	0	0	100
600	29,3	0	0	100
900	29,3	0	0	100
1200	29,4	277	0	93
1500	29,4	277	0	94
1800	29,4	277	0	95
2100	29,4	277	0	96
2400	29,5	553	0	93
2700	29,5	553	0	94
3000	29,5	553	0	94
3300	29,6	830	0	92
3600	29,6	830	0	93

Tabla 10A. Datos celda 3. $R_c = 4.7 \, \Omega$, $V = 4.09 \, \text{V}$, $I = 0.79 \, \text{A}$, $T_{\text{amb}} = 29.3 \, ^\circ\text{C}$, $P = 3.23 \, \text{W}$

3º Prueba

tiempo (s)	$T_g \, (^\circ\text{C})$	E (J)	Q (W)	$\eta \, (\%)$
0	$28,4 \pm 0,1$	0	0	100



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
300	28,4 ± 0,1	0	0	100
600	28,4 ± 0,1	0	0	100
900	28,5 ± 0,1	276	0,3	95
1200	28,6 ± 0,1	552	0,5	92
1500	28,7 ± 0,1	828	0,6	90
1800	28,7 ± 0,1	828	0,5	92
2100	28,8 ± 0,1	1105	0,5	91
2400	28,8 ± 0,1	1105	0,5	92
2700	28,9 ± 0,1	1381	0,5	91
3000	29,0 ± 0,1	1658	0,6	90
3300	29,1 ± 0,1	1934	0,6	89
3600	29,3 ± 0,1	2488	0,7	88

Tabla 11A. Datos celda 1. $R_c = 2.3 \, \Omega$, $V = 3.81 \, V$, $I = 1.45 \, A$, $T_{amb} = 28.4 \, ^\circ C$, $P = 5.52 \, W$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,4	0	0	100
300	29,4	0	0	100
600	29,4	0	0	100
900	29,5	277	0	95
1200	29,5	277	0	96



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
1500	29,6	553	0	94
1800	29,6	553	0	95
2100	29,7	830	0	94
2400	29,8	1107	0	93
2700	29,9	1384	0,5	92
3000	30,0	1661	0,6	91
3300	30,7	3604	1,1	83
3600	31,0	4439	1,2	80

Tabla 12A. Datos celda 2. $R_c = 2.3 \Omega$, $V = 4.04 \text{ V}$, $I = 1.54 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.4 \text{ °C}$, $P = 6.22 \text{ W}$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	30,2	0	0	100
300	30,2	0	0	100
600	30,2	0	0	100
900	30,3	277	0,3	95
1200	30,3	277	0,2	97
1500	30,4	554	0,4	94
1800	30,5	831	0,5	93
2100	30,6	1109	0,5	92
2400	30,7	1386	0,6	91



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
2700	30,8	1664	0,6	91
3000	30,9	1942	0,6	90
3300	31,0	2220	0,7	90
3600	31,2	2776	0,8	88

Tabla 13A. Datos celda 3. $R_c = 2.3 \, \Omega$, $V = 4.12 \, V$, $I = 1.61 \, A$, $T_{amb} = 30.2 \, ^\circ C$, $P = 6.63 \, W$

4° Prueba

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	28,7	0	0	100
300	28,7	0	0	100
600	28,8	276	0,5	97
900	28,9	553	0,6	95
1200	29,0	829	0,7	95
1500	29,1	1105	0,7	95
1800	29,2	1382	0,8	94
2100	29,3	1659	0,8	94
2400	29,5	2212	0,9	93
2700	29,6	2490	0,9	93
3000	29,7	2767	0,9	93
3300	29,8	3044	0,9	93



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
3600	29,9	3321	0,9	93

Tabla 14A. Datos celda 1. $R_c = 0.9 \Omega$, $V = 4.09 \text{ V}$, $I = 3.29 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 28.7 \text{ °C}$, $P = 13.46 \text{ W}$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,7	0	0	100
300	29,8	277	1	92
600	29,9	554	0,9	92
900	30,1	1107	1,2	89
1200	30,3	1662	1,4	88
1500	30,6	2495	1,7	86
1800	30,7	2773	1,5	87
2100	31,0	3607	1,7	85
2400	31,5	5000	2,1	82
2700	31,9	6116	2,3	80
3000	32,0	6396	2,1	82
3300	32,3	7235	2,2	81
3600	32,7	8355	2,3	80

Tabla 15A. Datos celda 2. $R_c = 0.9 \Omega$, $V = 3.773 \text{ V}$, $I = 3.07 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.7 \text{ °C}$, $P = 11.58 \text{ W}$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,1	0	0	100



tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
300	29,1	0	0	100
600	29,2	276	1	97
900	29,3	553	0,6	96
1200	29,4	830	0,7	95
1500	29,5	1106	0,7	95
1800	29,6	1383	0,8	95
2100	29,7	1660	0,8	94
2400	29,8	1937	0,8	94
2700	29,9	2214	0,8	94
3000	29,9	2214	0,7	95
3300	30,0	2491	0,8	95
3600	30,0	2491	0,7	95

Tabla 16A.Datos celda 3. $R_c = 0.9 \Omega$, $V = 4.019 \text{ V}$, $I = 3.37 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 14.12 \text{ W}$

5° Prueba

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,1	0	0	100
300	29,2	276	1	96
600	29,5	1106	1,8	92
900	29,9	2214	2,5	89
1200	30,6	4158	3,5	84



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
1500	30,9	4993	3,3	85
1800	31,4	6387	3,6	84
2100	32,0	8064	3,8	83
2400	32,7	10026	4,2	81
2700	33,3	11713	4,3	80
3000	33,8	13122	4,4	80
3300	34,3	14535	4,4	80
3600	34,9	16233	4,5	79

Tabla 17A. Datos celda 1. $R_c = 0.4 \, \Omega$, $V = 4.01 \, V$, $I = 5.4 \, A$, $T_{amb} = 29.1 \, ^\circ C$, $P = 21.65 \, W$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	28,9	0	0	100
300	29,0	276	1	96
600	29,2	829	1,4	94
900	29,4	1383	1,5	93
1200	29,7	2212	1,8	92
1500	30,0	3045	2,0	91
1800	30,2	3600	2,0	91
2100	30,6	4712	2,2	90
2400	31,9	8340	3,5	84
2700	32,7	10584	3,9	82



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
3000	33,4	12553	4,2	81
3300	33,9	13963	4,2	81
3600	34,2	14811	4,1	81

Tabla 18A. Datos celda 2. $R_c = 0.4 \, \Omega$, $V = 4.00 \, V$, $I = 5.5 \, A$, $T_{amb} = 28.9 \, ^\circ C$, $P = 22.00 \, W$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,9	0	0	100
300	30,0	277	1	96
600	30,2	831	1,4	94
900	30,4	1385	1,5	93
1200	30,7	2218	1,8	92
1500	31,4	4166	2,8	88
1800	31,7	5002	2,8	88
2100	32,0	5840	2,8	88
2400	32,7	7798	3,3	86
2700	33,3	9482	3,5	85
3000	33,7	10607	3,5	85
3300	34,1	11734	3,6	85
3600	34,6	13146	3,7	84

Tabla 19A. Datos celda 3. $R_c = 0.4 \, \Omega$, $V = 4.08 \, V$, $I = 5.61 \, A$, $T_{amb} = 29.9 \, ^\circ C$, $P = 22.89 \, W$



6º Prueba

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,2	0	0	100
300	29,5	830	3	92
600	30,1	2492	4,2	88
900	30,7	4159	4,6	86
1200	31,2	5552	4,6	86
1500	32,2	8346	5,6	83
1800	32,9	10310	5,7	83
2100	33,5	11998	5,7	83
2400	34,4	14538	6,1	82
2700	35,1	16521	6,1	82

Tabla 20A. Datos celda 1. $R_c = 0.1 \Omega$, $V = 4.18 \text{ V}$, $I = 7.98 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.2 \text{ °C}$, $P = 33.36 \text{ W}$

tiempo (s)	Tg (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,4	0	0	100
300	29,7	829	3	92
600	30,2	2216	3,7	89
900	30,7	3604	4,0	88
1200	31,2	4996	4,2	87
1500	32,2	7790	5,2	84
1800	33,4	11158	6,2	81



tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
2100	34,2	13414	6,4	81
2400	35,5	17096	7,1	78
2700	36,4	19658	7,3	78

Tabla 21A. Datos celda 2. $R_c = 0.1 \Omega$, $V = 4.19 \text{ V}$, $I = 7.81 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.4 \text{ °C}$, $P = 32.72 \text{ W}$

tiempo (s)	T _g (°C)	E (J)	Q (W)	η (%)
0	29,1	0	0	100
300	29,6	1383	1	98
600	29,9	2214	0,9	97
900	30,2	3046	1,3	96
1200	30,6	4158	1,7	95
1500	31,1	5550	2,3	93
1800	31,3	6108	2,5	93
2100	31,5	6666	2,7	92
2400	34,1	13969	5,7	83
2700	34,4	14817	6,0	82

Tabla 22A. Datos celda 3. $R_c = 0.1 \Omega$, $V = 4.18 \text{ V}$, $I = 8.05 \text{ A}$, $T_{\text{amb}} = 29.1 \text{ °C}$, $P = 33.65 \text{ W}$.

ANEXO III. Hoja de características del MOSFET IRF 740



IRF740

N - CHANNEL 400V - 0.48 Ω - 10 A - TO-220
PowerMESH™ MOSFET

TYPE	V _{DS}	R _{DS(on)}	I _D
IRF740	400 V	< 0.55 Ω	10 A

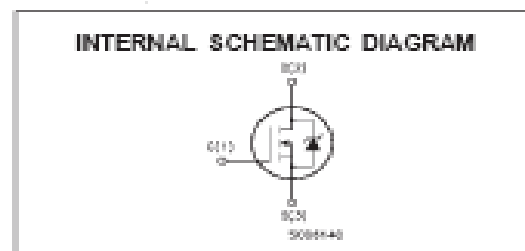
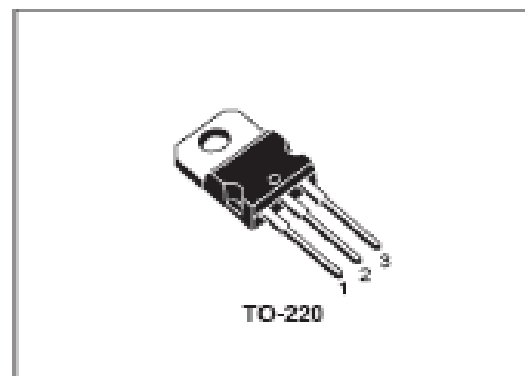
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.48 Ω
- EXTREMELY HIGH dV/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

APPLICATIONS

- HIGH CURRENT SWITCHING
- UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)
- DC/DC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DS}	Drain-source Voltage (V _{GS} = 0)	400	V
V _{DSs}	Drain- gate Voltage (R _{DS} = 20 k Ω)	400	V
V _{GS}	Gate-source Voltage	± 20	V
I _D	Drain Current (continuous) at T _a = 25 °C	10	A
I _D	Drain Current (continuous) at T _a = 100 °C	6.3	A
I _{DSM} (*)	Drain Current (pulsed)	40	A
P _{tot}	Total Dissipation at T _a = 25 °C	125	W
	Derating Factor	1.0	W/°C
dV/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	4.0	V/ns
T _{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T _J	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

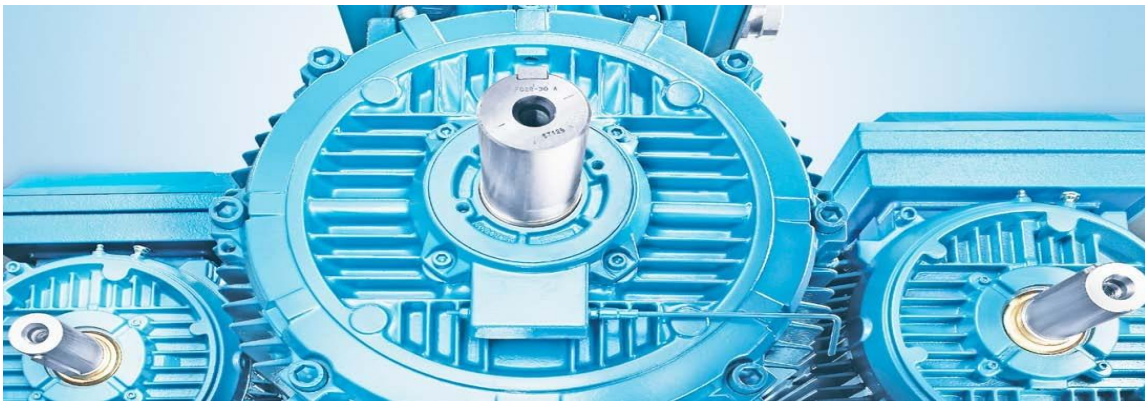
(*) Pulsewidth limited by safe operating area

(1) I_D ≤ 10 A, dI_D ≤ 10 A/μs, V_{GS} = V_{DS}, T_J ≤ T_{max}

First Digt of the Datecode Being Z or K. Identifies Silicon Characterized in this Datasheet

ANEXO IV. Método de medida de eficiencia del motor según normativa IEC

IEC 60034-2-1 standard on efficiency measurement methods for low voltage AC motors.



The International Electrotechnical Commission (IEC) has introduced a new standard IEC/EN 60034-2-1: 2007. This standard cancels and replaces the previous one IEC 60034-2: 1996.

IEC/EN 60034-2-1, which came into force in September 2007, introduces new rules concerning the testing methods to be used for determining losses and efficiency. The resulting efficiency values differ from those obtained under the previous IEC testing standard, IEC 60034-2: 1996.

How is motor efficiency measured?

The efficiency of a motor is defined as the ratio of output (mechanical) power to input (electrical) power. It can be measured or determined directly or indirectly.

Direct measurement involves measuring the input power on the basis of the voltage and current supplied, and the output power based on the rotational speed and torque.

Indirect measurement involves measuring the input power and calculating the output power on the basis of the losses within the motor.

Motor losses can be split into five major areas:

- copper losses
- iron losses
- rotor losses
- friction and windage losses
- additional load losses (P_{LL})

Of these, the first four types of loss can be determined from input power, voltage, current, rotational speed and torque. Additional load losses (P_{LL}) are much more difficult to determine, IEC/EN 60034-2-1 therefore specifies different methods of determining P_{LL} which involve low, medium or high uncertainty.

IEC60034-30 stipulates, however, that for motors in efficiency classes IE2 and IE3 only low uncertainty methods are acceptable. This requirement is met by the determination of P_{LL} from residual losses measured.



How do the efficiency figures differ between IEC 60034-2: 1996 and IEC 60034-2-1: 2007

The table below shows examples of how the efficiency figures differ under the old and new standards for three different

sizes of motor. The rated current stamped on the motor rating plate will be slightly higher to comply with the new efficiency testing standard.

Rated output power	IEC/EN 60034-2: 1996	IEC 60034-2-1: 2007-09
7.5 kW, 2-pole motor	88.4%	87.9%
11 kW, 4-pole motor	90.9%	90.3%
160 kW, 4-pole motor	96.0%	95.4%

How has the IEC/EN 60034-2-1: 2007 efficiency testing standard changed measurement methods?

Efficiency testing standard IEC/EN 60034-2: 1996	Efficiency testing standard IEC 60034-2-1: 2007-09
Direct method	Direct method
Indirect method:	Indirect method:
– P_{LL} estimated at 0.5% of input power at rated load	– P_{LL} determined from measurement
	– P_{LL} estimated at 2.5% - 0.5% of input power at rated load
	– Eh star - alternative indirect method with mathematical calculation of P_{LL}
Winding losses in stator and rotor determined at 95°C.	Winding losses in stator and rotor determined at [25°C + temperature rise measured]

The indirect method based on P_{LL} determined from measurements is used in the USA and Canada, where it is required under the IEEE 112-B (2004) and CSA 390-98 (Reaffirmed 2005) standards. It is likely to be much more widely used under the IEC60034-2-1: 2007 standard.

P_{LL} determined on the basis of the input power of the motor (0.5%) was widely used by manufacturers under IEC 60034-2: 1996. However, the rules concerning the estimation of P_{LL} in the indirect measurement method have been made much more rigorous under the new standard and the new values are now taking into account the actual measured losses. The new standard also introduces new indirect measurement method options:

- P_{LL} determined from measurement.
- P_{LL} estimated at 2.5% - 0.5% of input power at rated load.
- Eh star: P_{LL} losses calculated by mathematical means.

How can motor users identify which measuring method has been used?

Manufacturers can select which of the measuring methods they apply. The motor documentation must state which method was used.

Please note that efficiency values provided by different motor

How does ABB apply the new standard?

Under the efficiency testing standard (IEC 60034-2-1: 2007),

- ABB has calculated efficiency values according to indirect method, with additional losses determined from measurement, which is the preferred low uncertainty method outlined in the standard.
- ABB has the equipment needed to perform the testing.
- ABB provides efficiency values according to IEC/EN 60034-2-1: 2007 and publish the values in the printed technical catalogs.

Standard IEC 60034-30, published October, 2008 defines three IE (International Efficiency) classes of single-speed, three-phase, cage induction motors. The efficiency classes are based on the testing methods specified in IEC 60034-2-1: 2007.

manufacturers are comparable only if the same measuring method has been used.



For more information please contact:

www.abb.com/motors&generators

© Copyright 2009 ABB. All rights reserved.
Specifications subject to change without notice.

Key to abbreviations:

IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CSA	Canadian Standards Association
EN	European Norm
P _L	Additional Losses

ANEXO V. Datos de eficiencia de los motores eléctricos según normativa IEC

IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors

The International Electrotechnical Commission has introduced a new standards relating to energy efficient motors.

IEC 60034-30 defines new efficiency classes for motors and harmonizes the currently different requirements for induction motor efficiency levels around the world. It will hopefully put an end to the difficulties encountered by manufacturers producing motors for the global market. Motor users will benefit through the availability of more transparent and easier to understand information.



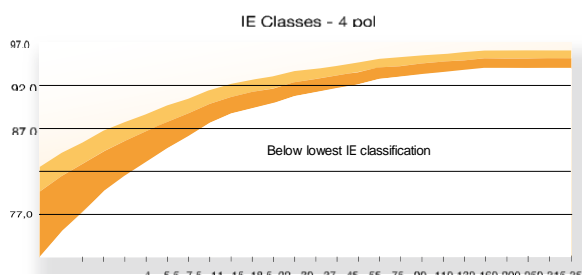
What are the new efficiency classes defined by IEC 60034-30: 2008?

The new standard defines three IE (International Efficiency) efficiency classes for single-speed, three phase, cage induction motors.

Premium efficiency	IE3	Premium
High efficiency	IE2	Comparable to EFF1
Standard efficiency	IE1	Comparable to EFF2

The standard also introduces IE4 (Super Premium Efficiency), a future level above IE3. IE4 products are not yet commercially available.

IE efficiency classes for 4-pole motors at 50 Hz



What motors are covered by the standard?

The scope of the new standard is wider than that of the agreement previously in force in Europe. IEC 60034-30 covers almost all motors (for example standard, hazardous area, marine, brake motors):

- Single-speed, three-phase, 50 and 60 Hz
- 2, 4 or 6-pole
- Rated output from 0.75 to 375 kW
- Rated voltage U_N up to 1000 V
- Duty type S1 (continuous duty) or S3 (intermittent periodic duty) with a rated cyclic duration factor of 80% or higher
- Capable of operating direct online 50 and 60 Hz

The following motors are excluded from IEC60034-30

- Motors made solely for converter operation
- Motors completely integrated into a machine (for example, pump, fan or compressor) that cannot be tested separately from the machine.

What is the new classification based on?

The efficiency levels defined in IEC 60034-30 are based on test



methods specified in IEC 60034-2-1: 2007 with low uncertainty for IE2 and IE3. The methods with IEC 60034-2-1 determine efficiency values more accurately than the methods previously used.

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Table 1 Table with efficiency classes: IE 60034-30 (2008)

kW	HP	IE-1 - Standard efficiency						IE2 - High efficiency						IE3 - Premium efficiency					
		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole	
		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.75	1	72.1	77.0	72.1	78.0	70.0	73.0	77.4	75.5	79.6	82.5	75.9	80.0	80.7	77.0	82.5	85.5	78.9	82.5
1.1	1.5	75.0	78.5	75.0	79.0	72.9	75.0	79.6	82.5	81.4	84.0	78.1	85.5	82.7	84.0	84.1	86.5	81.0	87.5
1.5	2	77.2	81.0	77.2	81.5	75.2	77.0	81.3	84.0	82.8	84.0	79.8	86.5	84.2	85.5	85.3	86.5	82.5	88.5
2.2	3	79.7	81.5	79.7	83.0	77.7	78.5	83.2	85.5	84.3	87.5	81.8	87.5	85.9	86.5	86.7	89.5	84.3	89.5
3		81.5	—	81.5	—	79.7	—	84.6	—	85.5	—	83.3	—	87.1	—	87.7	—	85.6	—
3.7	5	—	84.5	—	85.0	—	83.5	—	87.5	—	87.5	—	87.5	—	88.5	—	89.5	—	89.5
4		83.1	—	83.1	—	81.4	—	85.8	—	86.6	—	84.6	—	88.1	—	88.6	—	86.8	—
5.5	7.5	84.7	86.0	84.7	87.0	83.1	85.0	87.0	88.5	87.7	89.5	86.0	89.5	89.2	89.5	89.6	91.7	88.0	91.0
7.5	10	86.0	87.5	86.0	87.5	84.7	86.0	88.1	89.5	88.7	89.5	87.2	89.5	90.1	90.2	90.4	91.7	89.1	91.0
11	15	87.6	87.5	87.6	88.5	86.4	89.0	89.4	90.2	89.8	91.0	88.7	90.2	91.2	91.0	91.4	92.4	90.3	91.7
15	20	88.7	88.5	88.7	89.5	87.7	89.5	90.3	90.2	90.6	91.0	89.7	90.2	91.9	91.0	92.1	93.0	91.2	91.7
18.5	25	89.3	89.5	89.3	90.5	88.6	90.2	90.9	91.0	91.2	92.4	90.4	91.7	92.4	91.7	92.6	93.6	91.7	93.0
22	30	89.9	89.5	89.9	91.0	89.2	91.0	91.3	91.0	91.6	92.4	90.9	91.7	92.7	91.7	93.0	93.6	92.2	93.0
30	40	90.7	90.2	90.7	91.7	90.2	91.7	92.0	91.7	92.3	93.0	91.7	93.0	93.3	92.4	93.6	94.1	92.9	94.1
37	50	91.2	91.5	91.2	92.4	90.8	91.7	92.5	92.4	92.7	93.0	92.2	93.0	93.7	93.0	93.9	94.5	93.3	94.1
45	60	91.7	91.7	91.7	93.0	91.4	91.7	92.9	93.0	93.1	93.6	92.7	93.6	94.0	93.6	94.2	95.0	93.7	94.5
55	75	92.1	92.4	92.1	93.0	91.9	92.1	93.2	93.0	93.5	94.1	93.1	93.6	94.3	93.6	94.6	95.4	94.1	94.5
75	100	92.7	93.0	92.7	93.2	92.6	93.0	93.8	93.6	94.0	94.5	93.7	94.1	94.7	94.1	95.0	95.4	94.6	95.0
90	125	93.0	93.0	93.0	93.2	92.9	93.0	94.1	94.5	94.2	94.5	94.0	94.1	95.0	95.0	95.2	95.4	94.9	95.0
110	150	93.3	93.0	93.3	93.5	93.3	94.1	94.3	94.5	94.5	95.0	94.3	95.0	95.2	95.0	95.4	95.8	95.1	95.8
132		93.5	—	93.5	—	93.5	—	94.6	—	94.7	—	94.6	—	95.4	—	95.6	—	95.4	—
150	200	—	94.1	—	94.5	—	94.1	—	95.0	—	95.0	—	95.0	—	95.4	—	96.2	—	95.8
160		93.8	—	93.8	—	93.8	—	94.8	—	94.9	—	94.8	—	95.6	—	95.8	—	95.6	—
185	250	—	94.1	—	94.5	—	94.1	—	95.4	—	95.4	—	95.0	—	95.8	—	96.2	—	95.8
200		94.0	—	94.0	—	94.0	—	95.0	—	95.1	—	95.0	—	95.8	—	96.0	—	95.8	—
220	300	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
250	350	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
300	400	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
330	450	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
375	500	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8

The resulting efficiency values differ from those obtained under the previous IEC testing standard, IEC 60034-2: 1996, which generally gave higher overall efficiency values as the estimated additional losses were too low.

Manufacturer's documentation must show how the efficiency values are determined. Efficiency values can only be compared if they are based on the same testing method.

What are the threshold levels of the motor efficiency classes?

Table 1 above shows the threshold levels of the motor efficiency classes for two-, four- and six-pole motors between 0.75 and 375 kW (50 and 60 Hz).

How is the IE class marked?

The lowest efficiency value and the associated IE-code of the motor are shown on the rating plate.

How is IEC60034-30 compatible with other efficiency standards?

Differences still exist between the various standards. The new IEC standard harmonizes the currently different requirements for induction motor efficiency levels around the world, however, making the comparison easier. Work to harmonize standards continues.

Table 2 below shows a rough comparison between IEC60034-30 and other efficiency schemes.

The IEC60034-30 only defines the requirements for the efficiency classes and aims to create a basis for International consistency.

It does not specify which motors must be supplied with which efficiency level. This is left to the respective regional legislation and European Directive. Each country will be advised to adopt the minimum efficiency levels compatible with EU Directive as a way to assure availability of the most efficient motors for users.

Table 2

IEC 60034-30	EU MEPS	CEMEP European voluntary agreement	US EPAAct	Other, similar local regulations
IE3 Premium efficiency	IE3 Premium efficiency		Identical to NEMA Premium efficiency	



IE2 High efficiency	IE2 High efficiency	Comparable to EFF1	Identical to NEMA Energy efficiency / EPACT	Canada Mexico Australia New Zealand Brazil 2009 China 2011 Switzerland 2012
IE1 Standard efficiency		Comparable to EFF2	Below standard efficiency	China Brazil Costa Rica Israel Taiwan Switzerland 2010

How does ABB apply the new standard?

- ABB has calculated the efficiency values under the efficiency testing standard (IEC60034-2-1: 2007) according to the indirect method, with additional losses determined from measuring.
 - ABB supplies a full range of motors in class IE2.
Also Premium efficiency motors in class IE3 are available.
- For more information please contact:

www.abb.com/motors&generators

© Copyright 2009 ABB. All rights reserved.
Specifications subject to change without notice.



Universidad Carlos III de Madrid

Estudio sobre la eficiencia energética de una motocicleta eléctrica
